

CIATEQ, A. C. Centro de Tecnología Avanzada  
Dirección de Posgrado



*Diseño y fabricación de banco flexible para calibración de  
un componente del turbocargador*

TESINA QUE PRESENTA

**Ing. José Luis Moreno Solís**  
**Asesor: Dra. Ma. Guadalupe Ortiz López**

Para obtener el grado de

**Maestro en**  
**Manufactura Avanzada**

San Luis Potosí, S.L.P.  
noviembre, 2021

## CARTA DE LIBERACIÓN DEL ASESOR



San Luis Potosí, San Luis Potosí, 23 de Agosto del 2021.

Mtro. Geovany González Carlos  
Coordinador Académico de Posgrado  
CIATEQ, A.C.

La abajo firmante, miembro del Comité Tutorial del Ing. Jose Luis Moreno Solís, una vez revisado su Proyecto Terminal de tesis, titulado "Diseño y fabricación de banco flexible para calibración de un componente del turbocargador" **autorizo** que el citado trabajo sea presentado por el alumno para su revisión, con el fin de alcanzar el grado de **Maestro en Manufactura Avanzada**.

Sin otro particular por el momento, agradezco la atención prestada.

Dra. Ma. Guadalupe Ortiz López  
Asesor Académico

## CARTA DE LIBERACIÓN DEL REVISOR



San Francisco de los Romo, Aguascalientes, 16 de Noviembre del 2021.

Dr. Óscar Hernández Uribe  
Director de Posgrado  
CIATEQ, A.C.

Por medio de la presente me dirijo a usted en calidad de Revisor del proyecto terminal del (la) alumno **José Luis Moreno Solls**, cuyo título es:

**"Diseño y fabricación de banco flexible para calibración de un componente del turbocargador"**

Después de haberlo leído, corregido e intercambiado información con el alumno, y realizado los cambios que le fueron sugeridos, puede ser autorizada su impresión, a fin de que se inicien los trámites correspondientes para su defensa.

Sin otro particular por el momento, y en espera de que mis sugerencias sean tomadas en cuenta en beneficio del estudiante y la Institución, agradezco la atención prestada.

Atentamente,



M en C. Rodolfo Rivera Barbosa

F31b Revisión: 01-Mar-2021

**"2021, Año de la Independencia"**

Circuito Aguascalientes Norte N°135, Parque Industrial del Valle de Aguascalientes  
CP. 20358, San José de los Romo, Ags. [www.ciateq.mx](http://www.ciateq.mx)

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi pareja Patricia por apoyarme siempre y en todo desde el inicio de nuestra carrera académica a la par de sus actividades y tiempos académicos y profesionales.

A mi familia mis padres ya que sin ellos no estaría en el lugar en el que estoy, a mis hermanos Sheyla, Jorge, Sandra y Ramses por siempre darme aliento en seguir adelante sin importar las circunstancias.

A mi asesora Dra. Ma. Guadalupe Ortiz López ya que me ha mostrado, guiado, aconsejado y enseñado en todo mi desarrollo académico.

A mis amigos Manuel, Jorge, Mauricio y a mis compañeros de trabajo Jesús, Yasmin y Luis por apoyarme en los proyectos que he emprendido siempre.

A mis maestros profesionales David y Vicente por ayudarme a enfocar mis conocimientos en ámbitos profesionales.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT- México) le agradezco la beca recibida durante el curso de la maestría.

## RESUMEN

Un sistema flexible de manufactura tiene la capacidad de fabricar diversas variedades de productos en tamaños de lote variables mediante un rápido cambio tanto de su arreglo físico como de sus instrucciones de programación. En el presente trabajo este concepto se extiende a un banco de pruebas que permite realizar la calibración a diversos modelos de turbocargadores que forman parte de un motor de combustión interna.

Partiendo de las características físicas de la familia de modelos de turbocargadores a calibrar, así como de los requerimientos solicitados por la empresa cliente en diversos rubros y a normativas que rigen a las ramas involucradas en su elaboración tales como la mecánica, electro-neumática, seguridad industrial, manufactura y ergonomía, se conceptualiza, diseña y realiza la posterior integración de tecnologías que dan por resultado un banco de pruebas de control de calidad altamente flexible.

Los resultados que se muestran corresponden a una primera etapa de dicho conjunto, el cual es operado de manera semiautomática, y permite la calibración de cuatro modelos diferentes de turbocargadores, los cuales en un futuro inmediato pueden extenderse a seis. Finalmente se propone una serie de modificaciones a realizar en un futuro mediano, que por medio la automatización total del conjunto permitirá extender su uso a la calibración de n número de modelos con características similares sin intervención humana asegurando altos estándares de calidad del producto final.

**Palabras clave:** Ingeniería y tecnología, Tecnología e ingeniería mecánicas, Equipo y maquinaria industrial.

## ABSTRACT

A flexible manufacturing system has the ability to manufacture several varieties of products in varying batch sizes by fast changing both their physical arrangement and programming instructions. In the present work, this concept is extended to a test bench that allows calibrating various turbocharger models that are part of an internal combustion engine.

Based on the physical characteristics of the family of turbocharger models to be calibrated, as well as the requirements requested by the client company in various areas and regulations that govern the branches involved in its development such as mechanics, pneumatics, industrial safety, manufacturing and ergonomics, the subsequent integration of technologies is conceptualized, designed and carried out, resulting in a highly flexible quality control test bench.

The results shown correspond to a first stage of this set, which is operated semi-automatically, and allows the calibration of four different models of turbochargers, which in the immediate future can be extended to six one. Finally, a series of modifications is proposed to be carried out in the immediate future, which by means of the total automation of the set will allow its use to be extended to the calibration of n number of models with similar characteristics without human intervention, ensuring high quality standards of the final product.

**Keywords:** Engineering and Technology, Mechanical technology and engineering, Industrial equipment and machinery.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN.....	iv
ABSTRACT.....	v
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
ÍNDICE DE TABLAS.....	xii
GLOSARIO.....	xiii
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. ANTECEDENTES.....	1
1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	2
1.3. JUSTIFICACIÓN.....	2
1.4. OBJETIVOS.....	5
1.4.1. Objetivo general.....	5
1.4.2. Objetivos específicos.....	6
1.5. HIPÓTESIS.....	6
1.6. METODOLOGÍA PROPUESTA.....	7
2. MARCO TEÓRICO.....	9
2.1. DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE A CALIBRAR.....	9
2.1.1. Motor de combustión interna.....	9
2.1.2. Re-uso de energía.....	11
2.2. SISTEMAS DE MANUFACTURA.....	13
2.2.1. Sistemas convencionales de producción.....	13
2.2.2. Tecnologías de grupos.....	14
2.2.3. Sistemas de manufactura flexible.....	16
2.3. OTRAS TÉCNICAS Y METODOLOGÍAS DE APOYO.....	21
2.3.1. Administración de proyectos.....	21
2.3.2. Ingeniería y manufactura esbelta.....	21
2.3.3. Ingeniería de control.....	24
2.3.4. Diseño mecánico.....	25
2.3.4.1. Tecnologías de apoyo en diseño mecánico.....	25
2.3.4.2. Ajustes y tolerancias geométricas.....	28
2.3.4.3. Otras consideraciones.....	30

2.3.5. Ergonomía.....	30
3. PROCEDIMIENTO.....	32
3.1. FASE 1: ANÁLISIS DE REQUERIMIENTOS Y RECOLECCIÓN DE DATOS .....	32
3.1.1. Requerimiento de cliente.....	33
3.1.2. Análisis morfológico y definición de familia de partes .....	36
3.1.3. Determinación de las funciones a realizar en el banco flexible de pruebas .....	39
3.2. FASE 2: DISEÑO.....	39
3.2.1. Diseño conceptual.....	40
3.2.2. Diseño a detalle .....	41
3.2.2.1. Diseño estructural .....	41
3.2.2.2. Diseño de herramientas .....	43
3.2.2.3 Diseño neumático y electro-neumático .....	44
3.2.2.4 Diseño eléctrico .....	45
3.2.2.5 Diseño del sistema de control.....	46
3.3. FASE 3: MONTAJE E INTEGRACIÓN DE EQUIPOS EN BANCO FLEXIBLE.....	1
3.3.1. Montaje y calibración de transductor LVDT.....	1
3.3.2. Consideraciones de atornillador.....	4
3.3.4. Equipos neumáticos .....	4
3.3.3. Redes computacionales.....	5
4. RESULTADOS .....	7
4.1. FASE 4: INSTALACIÓN Y PUESTA A PUNTO.....	7
4.1.1. Estructura final.....	9
4.1.2. Protecciones y dispositivos de seguridad .....	9
4.1.3. Gabinete eléctrico .....	11
4.1.4. Sistema neumático y electro-neumático .....	13
4.1.5. Sistema para visualización y control de los parámetros de pruebas .....	16
4.2. DISPOSICIÓN FINAL DE DISPOSITIVOS Y EQUIPOS EN EL ÁREA DE OPERACIÓN .....	20
CONCLUSIONES .....	38
RECOMENDACIONES .....	40
APORTACIÓN DE LA TESIS.....	41
APORTACIÓN SOCIAL DE LA TESIS.....	42
REFERENCIAS .....	43

ANEXOS.....51

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ciclo Otto.....	10
Figura 2. Ciclo Diesel.....	10
Figura 3. Gráfica variedad de productos y cantidad.....	19
Figura 4. Esquema general de proyectos .....	22
Figura 5. Etapas SMED .....	24
Figura 6. Operaciones de prueba y calibración modelo A .....	37
Figura 7. Operaciones de prueba y calibración modelo B.....	37
Figura 8. "Cero Pieza" modelo A .....	38
Figura 9. "Cero Pieza" modelo B.....	38
Figura 10. Área de trabajo común familia de partes.....	39
Figura 11. Diseño Conceptual General .....	40
Figura 12. Diseño CAD alturas de carga .....	42
Figura 13. Diseño CAD distancia de carga.....	42
Figura 14. Diseño CAD componentes estructura.....	43
Figura 15. Diagrama de flujo general .....	48
Figura 16. Diseño conceptual dimensiones de producto.....	2
Figura 17. Diseño conceptual zona de detección.....	2
Figura 18. Diseño conceptual dimensiones LVDT:.....	3
Figura 19. Diagrama interconexión equipos.....	5
Figura 20. Pantalla táctil HMI .....	6
Figura 21. Diseño CAD final banco flexible de calibración:.....	7
Figura 22. Diseño CAD estructura:.....	9
Figura 23. Diseño CAD dispositivos de seguridad banco flexible .....	10
Figura 24. Diseño CAD distancia de seguridad.....	10
Figura 25. Diseño CAD final gabinete eléctrico banco flexible .....	11
Figura 26. Relevador de seguridad SICK.....	12
Figura 27. Gabinete eléctrico banco flexible .....	12
Figura 28. Diagrama neumático unidad de mantenimiento.....	13
Figura 29. Diagrama neumático distribución de flujo .....	14
Figura 30. Diagrama neumático control de aire.....	14

Figura 31. Diagrama neumático general final..... 15

Figura 32. Diseño CAD final posición de unidad mantenimiento..... 16

Figura 33. Sistema LOTO..... 16

Figura 34. Distribución de sensores y equipos banco flexible..... 17

Figura 35. HMI pantalla principal ..... 17

Figura 36. HMI pantalla "Operación y Modelo" ..... 18

Figura 37. HMI pantalla "Monitoreo de proceso" ..... 18

Figura 38. HMI pantalla "Monitoreo de Torque" ..... 19

Figura 39. HMI botones virtuales principales ..... 19

Figura 40. Diseño CAD vista general montaje HMI banco flexible ..... 20

Figura 41. Diseño CAD final distribución herramientas operación ..... 21

Figura 42. Diseño CAD rango amplitud área de trabajo..... 22

Figura 43. Diseño CAD rango altura área de trabajo..... 22

Figura 44. Diseño CAD rango profundidad área de trabajo ..... 23

Figura 45. Diseño CAD final base intercambio banco flexible..... 23

Figura 46. Diseño 2D final base intercambio..... 24

Figura 47. Diseño 2D final punta conector ..... 24

Figura 48. Diseño 2D final placa principal ..... 24

Figura 49. Diseño 2D final base LVDT..... 25

Figura 50. Diseño CAD final nido 1..... 25

Figura 51. Diseño CAD final nido 2..... 26

Figura 52. Diseño CAD final nido 3..... 26

Figura 53. Diseño CAD final nido 1 propiedades de masa..... 27

Figura 54. Diseño CAD final nido 2 propiedades de masa..... 27

Figura 55. Diseño CAD final nido 3 propiedades de masa..... 28

Figura 56. Diseño CAD atornillador con extensión..... 28

Figura 57. Diseño CAD uso conector neumático vertical..... 29

Figura 58. Diseño CAD uso conector neumático horizontal..... 29

Figura 59. Diseño CAD final posición LVDT nido 1 ..... 30

Figura 60. Diseño CAD final posición LVDT nido 2 ..... 30

Figura 61. Diseño CAD final posición LVDT nido 3..... 31

Figura 62. Diseño CAD Montaje LVDT..... 31

Figura 63. Diseño CAD final dispensador de anillos track.....	32
Figura 64. Diseño CAD llave de torque.....	32
Figura 65. Diseño CAD base del aplicador de resina.....	33
Figura 66. Pruebas parciales iniciales fabricación .....	34
Figura 67. Pruebas iniciales con dispositivos y equipos .....	34
Figura 68. Reporte aceptación de proyecto.....	35
Figura A1. Cortinas ópticas de seguridad.....	49
Figura A2. Datos Electroválvulas.....	50
Figura B1. Diagrama neumático conexión PACE 5000 .....	51

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Plan de inversión.....	5
Tabla 2. Tiempos de equipos.....	46
Tabla 3. Rangos de torque .....	4
Tabla 4. Datos generales del banco flexible .....	8
Tabla 5. Distancia mínima cortinas ópticas.....	11
Tabla 6. Pesos de equipos.....	33
Tabla 7. Comparativa requerimientos – logros.....	36

## GLOSARIO

**>**: Símbolo, elemento matemático usado para indicar que un valor es mayor a otro.

**2D**: Símbolo representación computacional gráfica bidimensional alto y largo.

**3D**: Símbolo representación computacional gráfica tridimensional alto, largo y ancho.

**5's**: Símbolo para metodología denominada por cinco letras "s", esto dado por las iniciales de cada uno de sus pasos o etapas.

**bar**: Símbolo para unidades de presión, un bar equivale a la presión generada por 0.98 atmosferas.

**dBA**: Símbolo dB decibel, sub-múltiplo de unidad para medir niveles de sonido; dBA decibel ponderado utilizado en altas y bajas frecuencias.

**Hz**: Símbolo para unidades de Hertzios, unidad para frecuencia que es el número de veces que se repite un fenómeno.

**kg**: Símbolo para unidades de masa (kilogramo), utilizado en el sistema internacional de unidades.

**m**: Símbolo para unidades de longitud (metro), utilizado en el sistema internacional de unidades.

**m<sup>3</sup>**: Símbolo para unidad de volumen, equivalente al volumen dentro de un cubo con medidas de un m en alto, largo y ancho.

**min**: Símbolo para el conjunto de tiempo igual a 60 segundos.

**mm**: Símbolo para submúltiplo de la milésima parte de un metro (m).

**mm/s**: Símbolo para unidades de velocidad, unidad de tiempo tomado por el desplazamiento de un punto a otro en milímetros por cada segundo.

**ms**: Símbolo para submúltiplo de la milésima parte de un segundo (s).

**N/m**: Símbolo para unidades de toque, medidas de unidades de torsión newton sobre metro.

**s:** Símbolo para unidades de tiempo (segundos), utilizado en el sistema internacional de unidades.

**V:** Símbolo para unidades de voltio o voltaje, utilizado para la unidad de potencial / fuerza electromotriz.

**V CA:** Símbolo para unidades de voltaje para corriente alterna.

**V CD:** Símbolo para unidades de voltaje para corriente directa.

**AMEF:** Iniciales para Análisis de Modo y Efecto de Fallos, técnica de uso estadístico con el cual se analizan todos los posibles eventos que pudieran presentarse propios del proceso analizado, contemplando todas las variables iniciales y finales que pudieran afectar.

**bit:** Dato utilizado en informática con un solo valor uno o cero.

**CAD:** Iniciales utilizadas para referirse al diseño asistido por computadora dado por las siglas en inglés de Computer Aided Design, tecnología utilizada como apoyo para generación de diseños 3D y dibujos 2D como proceso automatizado.

**CAE:** Iniciales utilizadas para referirse a la ingeniería asistida por computadora dado por las siglas en inglés de Computer Aided Engineering, tecnología utilizada para optimización, validación y simulación de diseños CAD.

**CAM:** Iniciales utilizadas para referirse a la manufactura asistida por computadora dado por las siglas en inglés de Computer Aided Manufacturing, tecnología utilizada como apoyo para la fabricación automatizada de piezas o productos en muchas ocasiones es principalmente usado equipos automatizados para la fabricación como máquinas de control numérico.

**CDM:** Iniciales utilizados para referirse a un modelo común de datos dado por las siglas en inglés de Common Data Model, estos son archivos con elementos y parámetros homogenizados para generar datos comunes de los modelos 3D para e intercambio de estos entre softwares de diferentes proveedores.

**CMM:** Iniciales utilizados para referirse a máquinas de medición de coordenadas dado por las siglas en inglés de Coordinate Measuring Machine, utilizadas principalmente en laboratorios de medición.

**ERP:** Iniciales en inglés de Enterprise Resource Planning, utilizadas para el software de soporte de administración de empresas desde administración de personal, materiales, recursos manufactureros y todo lo referente a producto.

**GALBP:** Iniciales en inglés de General Assembly Line Balancing Problem, utilizadas para la metodología de balanceo de líneas en líneas de ensamble.

**HMI:** Iniciales en inglés para Human Machine Interface, dispositivo utilizado comúnmente en la visualización de datos en proceso y otros equipos, mediante un panel táctil usado como interfaz hombre máquina.

**JIT:** Iniciales en inglés para Just In Time, metodología de manufactura denominada justo a tiempo en donde los datos, recursos y personal están en el lugar, tiempo y cantidad necesarios.

**LVDT:** Iniciales en inglés para Linear Variable Differential Transformer, utilizadas para la designación de un transformador diferencial de variación lineal, este dispositivo es usualmente utilizado para medición y comparación de deformaciones axiales o radiales.

**MCTS:** Iniciales en inglés de Monte-Carlo Tree Search, utilizadas para la metodología de resolución de problemas mediante árboles, ramificaciones y con bases en algoritmos.

**MES:** Iniciales en inglés de Manufacturing Execution System, utilizadas para el software de soporte en el flujo, control y monitoreo de información de empresas.

**PDM:** Iniciales utilizados para referirse a la gestión de datos de productos dado por las siglas en inglés de Product Data Management, tecnología utilizada como apoyo para la gestión de sistemas centralizados de los datos del producto.

**PLC:** Iniciales en inglés para Programmable Logic Controller, dispositivo utilizado como interfaz programable de señales eléctricas, conocido en español como Controlador Lógico Programable.

**Poka-Yoke:** Técnica utilizada en sistemas para evitar errores, principalmente componentes físicos sencillos. Uno de los ejemplos más utilizados es la geometría de conexión de las memorias USB.

**SALBP:** Iniciales en inglés de Simple Assembly Line Balancing Problem, utilizadas para la metodología de balanceo simple de líneas en líneas de ensamble.

**SMED:** Iniciales en inglés para Single Minute Exchange of Die, metodología aplicada en cambios de modelo en maquinaria como moldes, troqueles, herramientas, y configuraciones.

**TPM:** Iniciales en inglés para Total Productive Maintenance, metodología aplicada en la administración de equipos y tiempos de mantenimiento donde se pueden encontrar mantenimiento predictivo, preventivo y correctivo.

**WHR:** Iniciales utilizadas para referirse a la recuperación de calor residual en los sistemas de motores de combustión interna, dadas por las siglas en inglés de Waste Heat Recovery.

**WIP:** Iniciales en inglés de Work In Process, utilizadas para grupos de componentes generados entre maquinaria dentro de un proceso por tiempos de espera.

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. ANTECEDENTES

Los sistemas flexibles de manufactura surgen en los años 80's como resultado de las dificultades económicas que enfrentan las compañías en algunas ramas de la misma, en donde era recurrente el cierre de compañías, debido tanto a sobreproducción, así como al incremento de los requerimientos de calidad, diversidad de variantes, complejidad y disminución de tiempos de entrega de los productos fabricados.

Los productos elaborados en este tipo de sistemas presentan como características variedad tanto en los modelos de producto como en sus tamaños de lote aunado a un reducido tiempo de fabricación. Por lo tanto se hace necesario el desarrollo de técnicas, tecnologías, metodologías, herramientas y estudios que puedan lograr la reconfiguración adecuada de los sistemas (Hashemi-Petroodi et al. 2020)(Francas, Löhndorf, and Minner 2011)(Groover 2008).

El concepto de sistemas flexibles de manufactura sirve para designar a los sistemas de rápida adaptación a la fabricación con cambios dinámicos. Las empresas que cuentan con este tipo de sistemas que conduce a un rápido cambio de procesos de producción pueden lograr nuevos productos o modificaciones de los mismos sin aumentar los tiempos de puesta a punto (Hashemi-Petroodi et al. 2020)(Francas, Löhndorf, and Minner 2011).

Un sistema flexible de manufactura debe de ser capaz de aumentar la capacidad de respuesta a cambios en los mercados, los cuales se verán reflejados en los sistemas producción que permitirán generar una mayor variedad de productos. Este concepto se extiende no solo a las actividades puramente productivas sino también alcanza a ámbitos tales como el manejo de materiales o el control de calidad de los sistemas de manufactura (DeGarmo, Temple Black, and Kohser 1988). Por lo tanto, la implementación de sistemas flexibles de manufactura puede

darse en todos los rubros y ámbitos de industria de productos y servicios, buscando que sean redituables y con retorno de inversión a corto plazo.

## **1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA**

Integra Automation S. A. de C. V. tiene como cliente una empresa del ramo automotriz que realiza una prueba y calibración de turbocargadores. Estas operaciones se realizan mediante la simulación de ciertas condiciones de funcionamiento a modelos específicos que presentan variedad entre sus características físicas así como en su volumen de fabricación; por lo tanto, debe tenerse un tiempo de respuesta mínimo al cambio de modelos y el mantenimiento del banco de pruebas. Esta prueba y calibración está apoyada con la yuxtaposición de diversos sistemas (mecánicos, neumáticos entre otros).

Adicionalmente el banco de pruebas debe emitir un documento donde se validen de manera clara y precisa los parámetros de calidad del turbocargador basados en los patrones estándar que permiten la repetibilidad y reproducibilidad de las pruebas a realizar, para proporcionar resultados de medición confiables para su uso posterior en el motor (Bolz, Rinaldi, and Kaufmann 2014).

## **1.3. JUSTIFICACIÓN**

La empresa cliente de Integra Automation tiene un reto a futuro, el cual es incorporar un banco de pruebas para calibración del componente del sistema de escape de un motor de combustión interna de diferentes modelos a su sistema de producción.

Como ya se mencionó, uno de los principales requerimientos del componente fabricado es el registro de sus parámetros de calibración, ya que hoy en día la demanda de alta calidad en la normativa de las empresas de ramo automotriz es muy alta. Adicionalmente el valor agregado del banco de pruebas a construir se enfoca a la reducción de tiempo y espacio de operación, ya que un sistema de manufactura es la integración de equipos y recurso humano, cuya función

principal es crear un producto por medio de uno o más procesos y operaciones de ensamble (Groover 2008).

En la planta del cliente se tienen múltiples líneas de producción en las cuales se corren diversos modelos con diferentes cargas de trabajo, lo cual abre paso a la posibilidad de optimizar el flujo de material sin tener tiempos muertos de máquinas que crearan “cuellos de botella”. Por esta razón es necesario generar nuevas máquinas que cuenten con la flexibilidad de correr un mayor número de modelos con rápidas adaptaciones de proceso, dando lugar a la interconexión de sistemas de manufactura con un flujo de material óptimo, que permite obtener el máximo provecho en gestión de recursos y costo de producción (Wang et al. 2021)(J. Li et al. 2020).

Un problema que se genera en la empresa cliente, es que al manejar la mayor parte de su producción general en un esquema tipo serie y al producirse modelos que entran en categoría de baja producción, se realiza una mezcla de los mismos, esto debido a ciertas variables que pueden incluso cambiar de un día a otro como es el inventario restante que se tiene en el mercado, campañas de publicidad, situación de la economía actual, situación política, situación social o ecología entre otros (Kück and Freitag 2021).

Al tener múltiples modelos de componentes del sistema de escape, es necesario inicialmente realizar un proceso en el cual se determinen las características físicas de los modelos que permitan generar una familia de partes basada en características similares en cuanto a su forma geométrica, materiales y/o procesos. Por lo anterior, se generará un desarrollo comercial benéfico para la producción arbitraria de modelos tratando de llevar el costo de herramientas a un costo cero (Stanistreet, Allwood, and Willoughby 2006).

Una vez determinada la familia de partes se procede a realizar una comparación económica de las posibles situaciones con cuatro modelos diferentes de turbocargadores, teniendo en cuenta que el diseño y fabricación de este banco

de pruebas son únicos y no se encuentran a la venta de manera comercial, por lo tanto, el costo estimado en la fabricación de un banco se toma como un 100%. Esto con la flexibilidad de introducir nuevos modelos, con tiempo de producción de 20 semanas.

Al tener inicialmente cuatro modelos de turbocargadores se generan situaciones donde cada uno de los modelos debe ser procesado en un banco de calibración de manera individual, por otro lado, esta misma puede ser realizada en un banco de calibración con la flexibilidad de realizar la misma operación en diferentes modelos. No solo se tiene una alta inversión económica inicial de los primeros cuatro bancos de calibración también esta se proyecta a tiempos y actividades de otros departamentos como producción / procesos / mantenimiento / logística / calidad, como se muestra en la Tabla 1.

Por lo tanto, todas las consideraciones económicas, tiempos y actividades de otros departamentos se reducen en gran escala al introducir un banco de calibración flexible. En la parte económica se observa que el ahorro es del 80% por máquina planeada proyectando la disposición para futuros herramientas, mientras que en la inversión total por los primeros cuatro modelos es del 60% aumentando este valor en cada ocasión que se introduzca un nuevo modelo.

Tabla 1. Plan de inversión

<b>Planeación maquinas convencionales</b>				
	<b>Máquina 01</b>	<b>Máquina 02</b>	<b>Máquina 03</b>	<b>Máquina 04</b>
Máquina base	97%	97%	97%	97%
Herramental	3%	3%	3%	3%
Total	100%	100%	100%	100%
Inversión Total	400%			
<b>Planeación máquina flexible</b>				
Máquina base	80%	0%	0%	0%
Herramental	20%	20%	20%	20%
Total	100%	20%	20%	20%
Inversión Total	160%			

Elaboración propia

Siendo que la empresa en que se desarrolló el proyecto, una prestadora de servicios, se protege la propiedad intelectual, por lo tanto, no se da la oportunidad de mostrar el informe completo en donde se realiza todo el desglose de las cotizaciones de cada una de las estaciones de ensamble, siendo esta una vista superficial y estimada de los costos y tiempos para la fabricación.

#### **1.4. OBJETIVOS**

Los puntos a lograr para llegar a un éxito en el desarrollo de una máquina flexible son los siguientes.

##### **1.4.1. Objetivo general**

Realizar la conceptualización, diseño y manufactura de un banco para la calibración de turbocargadores, desarrollando e integrando en cada una de estas etapas innovaciones en tecnologías de manufactura modernas para satisfacer los

requerimientos de la empresa cliente en cuanto a seguridad, ergonomía, modularidad y flexibilidad a cambios de modelo.

### **1.4.2. Objetivos específicos**

De manera particular se espera realizar los siguientes objetivos:

- a. Realizar análisis morfológico de los diferentes modelos de turbocargadores involucrados dentro del proceso de calibración, así obtener las variables morfológicas que sean de utilidad para formar parte compuesta (familias).
- b. Analizar punto de mejora a futuro, documentando las tecnologías integradas y sus próximos avances, para tener un historial de tecnología visible de mejora.
- c. Efectuar diseño en etapas mecánico conceptual, neumático conceptual e ingeniería a detalle de ambos; mediante el apoyo de software que permita modelar 3D y obtención de planos o dibujos 2D, para seguir con las etapas del proyecto revisiones y manufactura.
- d. Selección e integración de materiales y equipo que cumplan las necesidades iniciales y futuras del proceso, obteniendo materiales y equipos de línea o fabricación única.

### **1.5. HIPÓTESIS**

Es posible fabricar una máquina flexible que cumpla las especificaciones del cliente en cuanto diseño modular, seguridad industrial, digitalización y trazabilidad de información de proceso, así como flexibilidad a cambios de modelo, mediante el uso de herramientas CAD, electro-neumática, diseño de elementos de maquinaria y otras tecnologías de automatización.

## 1.6. METODOLOGÍA PROPUESTA

En este trabajo se propone la realización de una investigación tanto básica como aplicada, de tipo explicativa y cuantitativa la cual aporte como resultado final el diseño y fabricación de un banco flexible de calibración que permita introducir en un corto plazo cuatro modelos de turbocargadores, mientras que en un largo plazo se podrán introducir n números de modelos de turbocargadores. Actualmente se han producido bancos de calibración individuales, sin embargo, la calibración es realizada en múltiples modelos de turbocargadores, por lo tanto, es necesario un número n de bancos de calibración.

La organización de este documento es la siguiente. En el capítulo 2 denominado Marco Teórico, se presenta la recopilación de antecedentes, el estado del arte y consideraciones teóricas en las que se sustenta el desarrollo del proyecto. Inicialmente se realiza la descripción, uso, beneficios y ambiente de aplicación del elemento a calibrar, a fin de obtener consideraciones, alcances, funciones especiales e impacto de su uso. A continuación, se realiza un contraste entre los sistemas manufactura tradicionales y de manufactura flexible. En estos últimos se presenta tanto los conceptos de tecnologías de grupos y familia de partes. Finalmente se revisan otras técnicas y metodologías de apoyo para el desarrollo del banco de calibración como es la administración de proyectos, metodologías de manufactura esbelta, ingeniería de control, diseño mecánico y ergonomía.

En el capítulo 3, correspondiente al desarrollo de la metodología específica aplicada se hace inicialmente una descripción puntual de los requerimientos identificados por el cliente, se realizan los análisis necesarios para generar una familia de partes y parte compuesta, posteriormente se determinan los alcances y funciones del banco flexible de calibración con base en los requerimientos, presupuesto y necesidades funcionales del cliente sobre el producto. Una vez determinado los requerimientos se inicia la fase de diseño de las áreas involucradas al banco flexible de calibración apoyados de herramientas CAD/CAE, para con ellos alcanzar la fase de montaje e integración de equipos requeridos para el montaje y calibración del diafragma del turbocargador.

En el capítulo 4, se muestran los resultados referentes a diseño mecánico, eléctrico, neumático y de control los cuales cumplen con características de seguridad, modularidad, ergonomía y flexibilidad basados en normativas de carácter internacional solicitadas por la empresa cliente. Dichos conceptos son revisados, evaluados y aceptados bajo criterios tanto de un estudio de análisis de riesgo (realizado por una empresa externa), así como por la evaluación de eficiencia realizada por la empresa cliente en cuanto a las especificaciones solicitadas.

Finalmente se hace una recopilación de las conclusiones y resultados obtenidos a lo largo del presente trabajo, así como las recomendaciones futuras y aportaciones sobre el tema motivo del mismo.

## **2. MARCO TEÓRICO**

En esta sección se realizará la descripción del componente a calibrar así como de las técnicas aplicadas para la concepción del banco flexible de calibración.

### **2.1. DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE A CALIBRAR**

El componente que se validará por medio del banco flexible de calibración está integrado en el sistema de escape de los motores de combustión interna, apoyando la recuperación o regeneración de energía. La calibración de este componente debe ser realizada pieza por pieza y no por lotes o con alguna metodología de calidad y estadística, ya que las variables controladas mediante la calibración impactan directamente en la eficiencia tanto de los sistemas de combustión interna como en los componentes aledaños al mismo.

#### **2.1.1. Motor de combustión interna**

El fundamento del trabajo de los motores de combustión interna se basa en la transformación de combustibles, los cuales al sufrir un cambio en su estado físico de líquido a gas mediante ciclos termodinámicos permitirán finalmente obtener energía mecánica (Naber and Johnson 2014). Entre los motores de combustión interna destacan los motores a gasolina, basados en el ciclo Otto que se utilizan principalmente en el transporte vial (pasajeros) y el uso de los motores a diésel, basados en el ciclo homónimo, para el transporte de carga. Desde el inicio de su uso, el desarrollo de su tecnología no se ha detenido, teniendo como fin principal una mejor eficiencia en el consumo de combustible, mayor tiempo de vida y reducción de emisiones (Kesgin 2005).

En el caso del uso de accionamiento por gasolina se requiere el apoyo de una chispa externa para convertirla en energía, mientras que para el diésel se requiere un cambio de presión significativa. Adicionalmente se tendrán subproductos de la combustión con diferentes características en cuanto a la cantidad de contaminantes (Gonca et al. 2015).

En la Figura 1 se muestra las diferentes etapas del Ciclo Otto: 1 – 2 proceso de compresión isentrópico; 2 – 3 adición de calor en un proceso isocórico (ignición mediante chispa); 3 – 4 expansión en un proceso isentrópico; 4– 1 Escape, expulsión de calor residual al ambiente a volumen constante (Ge et al. 2005).

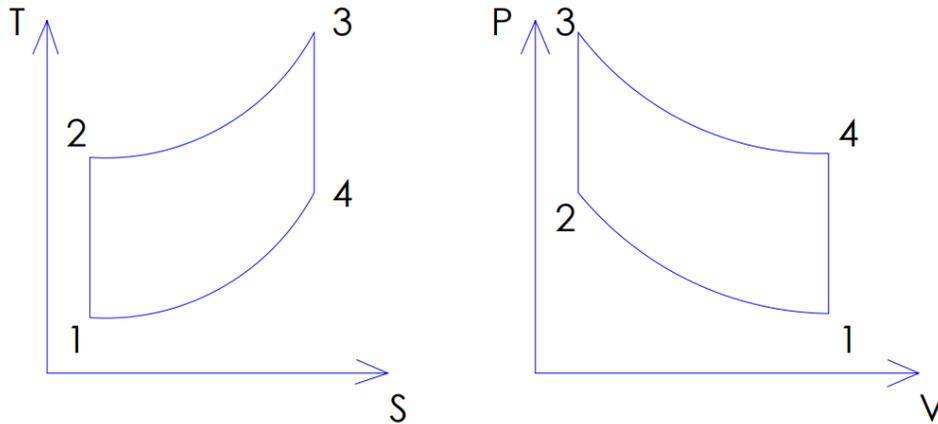


Figura 1. Ciclo Otto  
(Ge et al. 2005)

En la Figura 2 se muestra las diferentes etapas del Ciclo Diesel: 1-2 compresión isentrópica; 2-3 expansión a presión constante, primera parte de la carrera de potencia; 3-4 proceso de expansión isentrópico; 4-1 proceso de rechazo de calor a volumen constante (Parlak 2005).

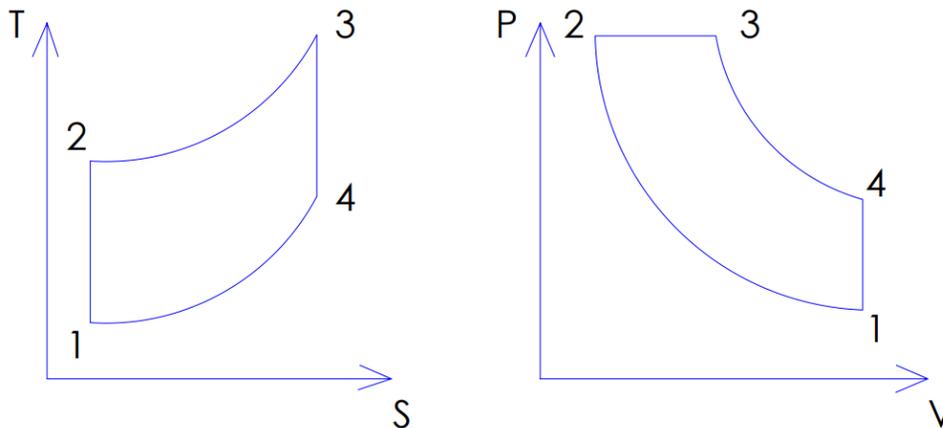


Figura 2. Ciclo Diesel  
(Parlak 2005)

En estos procesos en los que se maneja alta temperatura se utilizan generalmente combustibles fósiles los cuales tienen presencia de nitrógeno y oxígeno que generan subproductos contaminantes, la precaria oxigenación en la combustión da lugar al monóxido de carbono como uno de sus principales fluidos residuales (Mahmoudi, Khazaei, and Ghazikhani 2017).

A partir de la descripción de los ciclos de trabajo de los motores de combustión interna se concluye que estos son sistemas con capacidad para la generación de energía con base a la combinación de diversas tecnologías. Esta energía ha sido utilizada desde hace dos siglos y ha sido un factor primordial en las tres revoluciones industriales que han llevado a la evolución de la industria manufacturera; aunque recientes estudios muestran que el medio de transporte en Estados Unidos es el principal sector que emite gases de efecto invernadero (Arsie et al. 2015).

### **2.1.2. Re-uso de energía**

En los últimos años la industria automotriz se ha enfocado en reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, por lo tanto, el tamaño de los motores de nuevas generaciones ha ido decreciendo tanto en sus sistemas de potencia como en el sistema de expulsión de gases. Por esta razón la Comisión Europea ha emitido puntos estratégicos para la reducción de dichos gases en vehículos del año 2020 en adelante, esto será de reducir en promedio 0.95 kg por kilómetro recorrido de bióxido de carbono (Arsie et al. 2015).

Uno de los problemas principales, según se ha indicado, es el desperdicio de energía en el sistema de escape, ya que se expulsan gases con alta temperatura y presión que pueden ser reutilizados (Peat et al. 2006). Algunos autores comentan que se tienen un resultado de alrededor de 35% de la energía térmica generada se desperdicia y es expulsada como fluido de residuo (Woodyard 2009).

Este fenómeno impulsa la carrera en desarrollo de tecnologías para sistemas de "recuperación de calor residual" que en sus siglas en inglés se tiene como WHR (por las siglas en inglés de Waste Heat Recovery). El motivo principal es incrementar la

eficiencia general de los motores de combustión interna, lo cual implica tener en cuenta múltiples variables que al principio de dicha carrera se fueron enfocando de lo general a lo particular dando como resultado diferentes caminos de tecnología aplicable en el ámbito de motores de combustión interna (Naber and Johnson 2014)(Arav, Shulman, and Dooun 2016).

También se puede recordar que después de la crisis del petróleo en los años 70's del siglo pasado, las regulaciones federales y la preocupación ambiental ayudaron al arranque de la carrera del desarrollo de tecnologías en el sistema de escape, siendo esto una de las principales oportunidades de mejora de los motores sin aumentar los costos para el usuario final (Arsie et al. 2015).

Por lo tanto se pueden listar algunas de las ventajas en el desarrollo de tecnologías para el sistema de escape (Woodyard 2009)(Mahmoudi, Khazae, and Ghazikhani 2017):

1. Incrementa 20–50% la presión en el aire de entrada
2. Incremento de potencia del motor
3. Reducción de dimensiones y peso al motor aproximadamente 20%
4. Reducción de consumo de combustible aproximadamente 14%
5. Reducción de emisiones contaminantes

Algunos de los sistemas de recuperación de calor residual son: "turbocharging", "turbo-compounding", "Rankine cycle", "thermo-electric", "cabin cooling", "in-cylinder WHR". En la actualidad uno de los sistemas más robustos para la recuperación o regeneración de energía es el de turbocargador instalado en el sistema de escape de los motores de combustión interna. Los gases del escape calientes pueden ser utilizados en las reacciones endotérmicas de reformado de combustible manteniendo estas reacciones (Poran and Tartakovsky 2015). En el caso del turbocargador se tiene una relación de eficiencia, algunos autores comentan que el aumento en eficiencia de 1% del turbocargador puede tener como resultado en un 0.08% en la eficiencia del motor (Kesgin 2005).

## **2.2. SISTEMAS DE MANUFACTURA**

Los sistemas de manufactura son sistemas enfocados en la fabricación de productos, tomando en cuenta todos los pasos relacionados a la transformación de materiales, movimiento de materiales y manejo de información (Groover et al. 1997).

### **2.2.1. Sistemas convencionales de producción**

En la actualidad se pueden encontrar empresas donde no se cuente con sistemas de operación, control de sistemas de manufactura o algún tipo de sistema descentralizado. Ya que uno de los principales factores es el grado de necesidad por un cambio de nivel de una empresa, por lo tanto, empresas con poca necesidad de introducción de estos sistemas el descentralizar procesos y aplicar procesos complejos no es adecuado para ellas (Jaskó et al. 2020).

Empresas tradicionales manejan sistemas convencionales donde el producto es el centro de atención de las áreas involucradas como son el diseño, planeación, producción, asignación de maquinaria y dispositivos. Los procesos pueden estar separados o en departamentos, esto lleva consigo la necesidad de almacenes, movimiento, traslado y manipulación de materiales por diferentes áreas en la trayectoria del producto final (Socconini 2008). También con poca automatización de procesos se destacan los principales errores de inversión en la adquisición de maquinaria para tratar de aumentar la capacidad instalada y hacer frente a los conocidos cuellos de botella, siendo una solución a mediano plazo (Pantoja, Orejuela, and Bravo 2017).

Sabiendo que en la industria se puede trabajar diferentes tipos de operaciones de producción, producción continua en donde el producto adquirido es el mismo sin cambios y la salida de este es ininterrumpida, producción en lotes en donde la cantidad de producto es finita y la salida de este es en discontinua.

Debido a que muchos de los productos que circulan en diferentes mercados tienen un fin o servicio específico la demanda de usuario final puede ser muy baja. Una de las características principales de los sistemas de baja producción es el número de piezas, el cual siempre es menor a 50 por lote y los lotes se producirán máximo 12 veces por año (Russell and Taghipour 2019) o una cantidad menor a 100 por año, también se tiene mediana producción que son entre 100 y 10,000 piezas por año y por último una alta producción que inicia de las 10,000 piezas en adelante en esta última la capacidad instalada está dedicada exclusivamente a la fabricación del mismo.

Aunado a esto en cualquier empresa de manufactura se tienen la necesidad del manejo y almacenamiento de materiales, principalmente en las empresas no automatizadas se tiene un mayor empleo de tiempo para los movimientos entre operaciones, manejo y almacenamiento. Dentro de las empresas donde se aplica una producción en lotes, el material dentro de las empresas puede llegar a tener tiempos de 95% en movimientos y el 5% en operaciones de manufactura. Dentro del tiempo aplicado en operaciones de manufactura el 30% en aplicaciones de procesos de manufactura y el 70% en carga, descarga, posicionamiento etc.

### **2.2.2. Tecnologías de grupos**

Desde el inicio de la industrialización la producción se ha enfocado en la producción masiva de productos, en este camino han surgido cambios estratégicos a finales del siglo XVIII se tiene la división de trabajo, a finales del siglo XIX se presentan los fundamentos de la estandarización y por último en el siglo XX se han introducido nuevas formas de producir altos volúmenes de mismos productos (Socconini 2008).

Los sistemas de producción tradicionales se pueden catalogar como en línea y funcional; el sistema de producción en línea se enfoca en la fabricación de un tipo de producto donde difieren un mínimo sus procesos ni maquinaria, mientras que el sistema de producción funcional se maneja en base a departamentos. El sistema de producción basado en tecnología de grupos genera una nueva distribución de

maquinaria estudiando los procesos y operación de fabricación con el mínimo de interrupciones, por lo tanto, cambia su enfoque hacia las familias de partes semejantes.

Las familias de partes son grupos de piezas donde su fabricación tiene características similares en geometría o proceso, esto permite focalizar un grupo específico de maquinaria para la realización de estas familias y a un largo plazo aumentar la variedad de características integrando nuevas máquinas. Para la generación de estas familias de partes existen tres métodos generales: inspección visual, análisis de flujo de producción y clasificación / codificación de partes. Una vez identificadas las características en la familia de partes se genera una parte compuesta, esta parte compuesta permite identificar todos los procesos que conlleva la fabricación de las piezas de la familia de partes (Hameri 2011).

Considerando la familia de partes y la parte compuesta es posible aplicar el concepto de celda de manufactura el cual es utilizado en la planificación en la distribución de maquinaria (layout), para mejorar tiempos de proceso, productividad, eficiencia y disminución de costos de manejo de material (Pantoja, Orejuela, and Bravo 2017).

La celda de manufactura conjunta máquinas o procesos diversos en un grupo particular o celda, dedicados a la elaboración de productos o familias de productos. Dependiendo del grado de automatización y variedad de productos que se pueden realizar es posible clasificarlas en celda integradas por: máquinas individuales, máquinas con manejo manual de partes, máquinas con manejo semiintegrado de partes y por último y con mayor automatización se tienen las celdas de manufactura celular o sistemas de manufactura flexible. Las celdas de manufactura celular permiten procesar grupos de productos comunes, aumentando la variedad de estos ya que se destacan por crear rutas diferentes de paso y orden de flujo para cada uno de los productos. Dando como resultado procesos con diferentes procesos, rutas, flujo, volumen y maximiza las habilidades y reduce el número del personal (Pantoja, Orejuela, and Bravo 2017)(Socconini 2008).

Entre las ventajas con respecto a los sistemas tradicionales, un sistema de manufactura celular presenta:

1. Mayor continuidad en las operaciones de la planta
2. Disminución de los inventarios en proceso que generan defectos por manipulación
3. Creación de procesos flexibles al producir diversos productos en una sola área
4. Generación de eficiencia en utilización de personal
5. Posibilidad de conectar directamente las operaciones para evitar transportes, movimiento de materiales, inventarios en proceso y sobreproducción

### **2.2.3. Sistemas de manufactura flexible**

Un sistema de manufactura flexible es un grupo de estaciones de trabajo altamente automatizadas interconectadas con manejo de materiales y sistemas de almacén automáticos; todo esto controlado mediante sistemas computacionales distribuidos. La manufactura flexible ha tomado relevancia en las últimas dos décadas ya que se tiene precedentes en compañías con la habilidad de adherirse cambios en procesos de producción para nuevos productos o modificaciones de los mismos sin aumentar tiempos de procesos, teniendo bajos costos, mayor variabilidad de productos y una capacidad de pronta respuesta a fabricación con cambios dinámicos (Hashemi-Petroodi et al. 2020)(Francas, Löhndorf, and Minner 2011)(Stanistreet, Allwood, and Willoughby 2006)(Wahab and Stoyan 2008)(Diaz C. and Ocampo-Martinez 2021).

Las principales ventajas con respecto a los sistemas tradicionales que presentan este tipo de sistemas son:

1. Incremento en variedad de productos
2. Procesamiento de diferentes tamaños de lotes
3. Producción controlada y automatizada
4. Reconfiguración rápida en sistema de control
5. Reconfiguración rápida en sistema físico

6. Reducción de tiempos de entrega
7. Eliminación de actividades manuales

Los sistemas de manufactura flexible hoy en día se tienen como uno de los principales pilares de la cuarta revolución industrial, ya que sus metodologías y herramientas servirán como apoyo para esta nueva revolución. Siendo la base la descentralización de procesos y cadena de suministro es uno de sus principales objetivos, esto se logra mediante la introducción de automatización en maquinaria en diferentes niveles. Otro de los resultados de mayor impacto es la trazabilidad de información en el sistema ya que el estatus es en tiempo real, transparente y visible, siendo que se puede obtener información de productos como es el estado actual, paso en trayectoria, alternativas de trayectoria, historial y objetivo; mientras que en la maquinaria ofrece información como su estado actual, capacidad actual, mantenimiento necesario y posible configuración (Groover 2008)(Jaskó et al. 2020)

Adaptabilidad y desempeño son las bases que se requieren para integrar soluciones dinámicas en la parte del control del sistema. La adaptabilidad requerida proviene de las distintas ramas que en conjunto lo conforman tales como las ingenierías mecánica, eléctrica y de control (Querol et al. 2015)(Daniyan et al. 2020).

Estar dentro de los límites de un sistema flexible de manufactura da la capacidad de responder fácilmente a las necesidades de producción dinámica y requerimientos. Teniendo en cuenta que es la flexibilidad es multidimensional en el ramo de la manufactura se puede catalogar como una propiedad física, una herramienta estratégica, un atributo de decisión para fabricación y un indicador económico (Perraudat, Dauzère-Pérès, and Vialletelle 2021)(Wahab and Stoyan 2008).

Los sistemas de manufactura flexibles en sus inicios tomaron como base la reconfiguración dinámica, dando entrada a nuevas cargas de tiempos y en cambios de modelo / proceso / producto. Con el paso del tiempo se añadieron

diferentes metodologías y tecnologías como sistemas reconfigurables de manufactura, hablando en temas de control de la maquinaria. Estos dan lugar a sistemas de programación modular ayudando al cambio y ajuste rápido de las máquinas y sistemas (Querol et al. 2015)(Lee, Shin, and Lee 2020).

La flexibilidad debe ser apoyada con la automatización industrial, en la cual una de sus estructuras es el manejo de información con el que puede basar la toma de decisiones de forma automática en tiempo real en un sistema diseñado para un objetivo en específico apoyado con criterios de ingeniería (Beckers et al. 2021)(Hermann et al. 2020)(Córdoba Nieto 2006).

Dado a que la trayectoria de los procesos para la elaboración de un producto se realiza mediante un predeterminado número de maquinaria, órdenes de producción y secuencia de operaciones; la introducción de sistemas flexibles de manufactura debe buscar un equilibrio en la producción, aumentar la respuesta al cambio y tratar de disminuir los tiempos muertos en la maquinaria (Querol et al. 2015)(De Araujo and Previero 2019)(Lu, Xu, and Wang 2020)(Paraschos, Koulinas, and Koulouriotis 2020)(Muniraj and Xu 2021).

Los lotes de producción medios y variedad de producto medio es el entorno ideal para la implementación de sistemas flexibles de manufactura, ya que se tiene una relación inversa entre la variedad de productos y cantidad de productos producidos por empresas, como lo muestra la Figura 3.

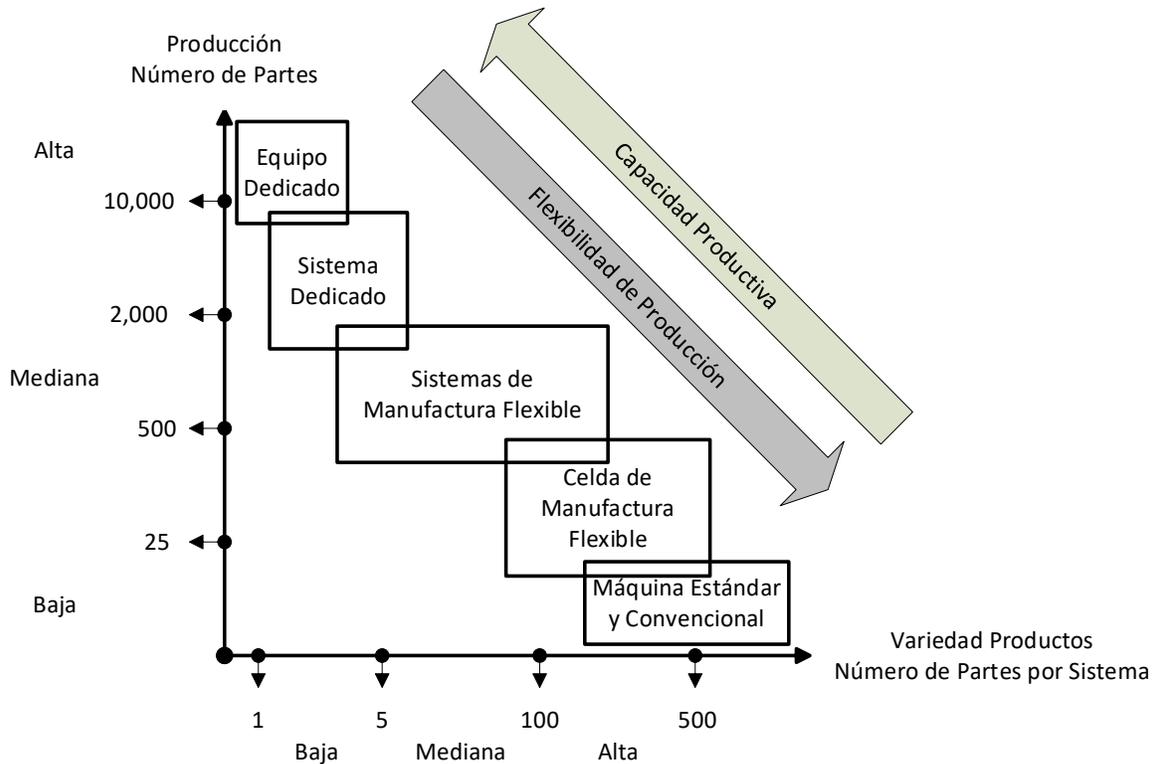


Figura 3. Gráfica variedad de productos y cantidad  
Elaboración propia

Tomando esta premisa se puede identificar un área de oportunidad para los sistemas flexibles en ámbitos industriales con capacidades definidas, al cambio de tamaños de lote y variedad de productos (Schuh et al. 2020)(Ullman 2010)(Jaskó et al. 2020). Estos deben ser apoyados por metodologías tales como ERP (por las siglas en inglés de Enterprise Resource Planning) y MES (por las siglas en inglés de Manufacturing Execution System). Con ello se generan sistemas de producción híbridos para alta y baja producción (Zanchettin 2021)(Messner et al. 2019)(Schuh et al. 2020), que en caso de tener un mal balanceo puede generar costos unitarios altos y altos tiempos de espera (Russell and Taghipour 2019).

Para evitar este tipo de inconveniente se requieren planeaciones avanzadas con métodos y soluciones acordes a las necesidades de distribuir la producción, por ello se utilizan métodos de balanceo de líneas con las cuales pueden generar trayectorias de proceso, métodos WIP (por las siglas en inglés de Work In Process) y líneas en forma U. Algunos de las principales métodos de balanceo de líneas son el

GALBP (por las siglas en inglés de General Assembly Line Balancing Problem), SALBP (por las siglas en inglés de Simple Assembly Line Balancing Problem) y en otros casos el MCTS (por las siglas en inglés de Monte-Carlo Tree Search). Personalizar un sistema de producción es de gran vitalidad hoy en día independientemente del volumen de producción (Pitakaso et al. 2021)(Muniraj and Xu 2021)(Lu, Xu, and Wang 2020)(Paraschos, Koulinas, and Koulouriotis 2020)(Wu et al. 2019)(Becker and Scholl 2006)(Groover 2008).

Otro punto logrado por la flexibilidad es el ahorro de energía en maquinaria, ya que varios autores (Y. Li et al. 2020)(Popp, Liebl, and Zaeh 2016)(Diaz C. and Ocampo-Martinez 2021) coinciden en que se puede llegar a un ahorro de energía por máquina de 10 – 25 %, ya que estos desperdicios son producidos por los tiempos de puesta en marcha e inactividad de maquinaria. Por lo tanto, cada modelo que pueda adaptarse en la máquina flexible es un mayor ahorro de energía.

## **2.3. OTRAS TÉCNICAS Y METODOLOGÍAS DE APOYO**

### **2.3.1. Administración de proyectos**

Para la elaboración de una máquina flexible es necesario de la yuxtaposición de la automatización dictada por la experiencia de proyectos realizados anteriormente. Estas similitudes serán tipo de proyecto, cliente y experiencia.

En la Figura 4 se muestra el esquema general de proyectos que normalmente se sigue en este tipo de personalizados proyectos, en el cual se pueden identificar las cuatro fases principales: análisis, diseño, desarrollo, instalación y puesta a punto. Igualmente se muestran la información y actividades que se manejan y/o realizan en cada uno de ellos.

### **2.3.2. Ingeniería y manufactura esbelta**

El mercado actualmente se inclina por el uso de sistemas de manufactura flexible con soporte de filosofías de “Manufactura Esbelta” en los flujos de proceso, esto con el fin de eliminar desperdicios en tiempo e incremento de producción sin dañar el valor generado en cada paso del proceso (Vijay and Gomathi Prabha 2020)(Wuthrich and Hof 2019).

La manufactura esbelta, es un método de organización del trabajo que se centra en la mejora continua y optimiza el sistema de producción al eliminar tanto desperdicios como actividades que no suman ningún valor al proceso. Basada en el sistema de producción Toyota propone múltiples metodologías, para lograr un sistema de producción “Justo a Tiempo JIT” (por las siglas en inglés de Just In Time), enfocándose en mejorar la distribución, calidad, variedad de producto, costo, tiempo de elaboración, eliminación de desperdicios y valor no agregado, en pocas palabras hacer más con menos. Para el desarrollo de un sistema flexible de manufactura son aplicables las metodologías Kanban, SMED (por sus siglas en inglés de Single Minute Exchange of Die), Poka-Yoke, 5’s y TPM (por sus siglas en inglés de

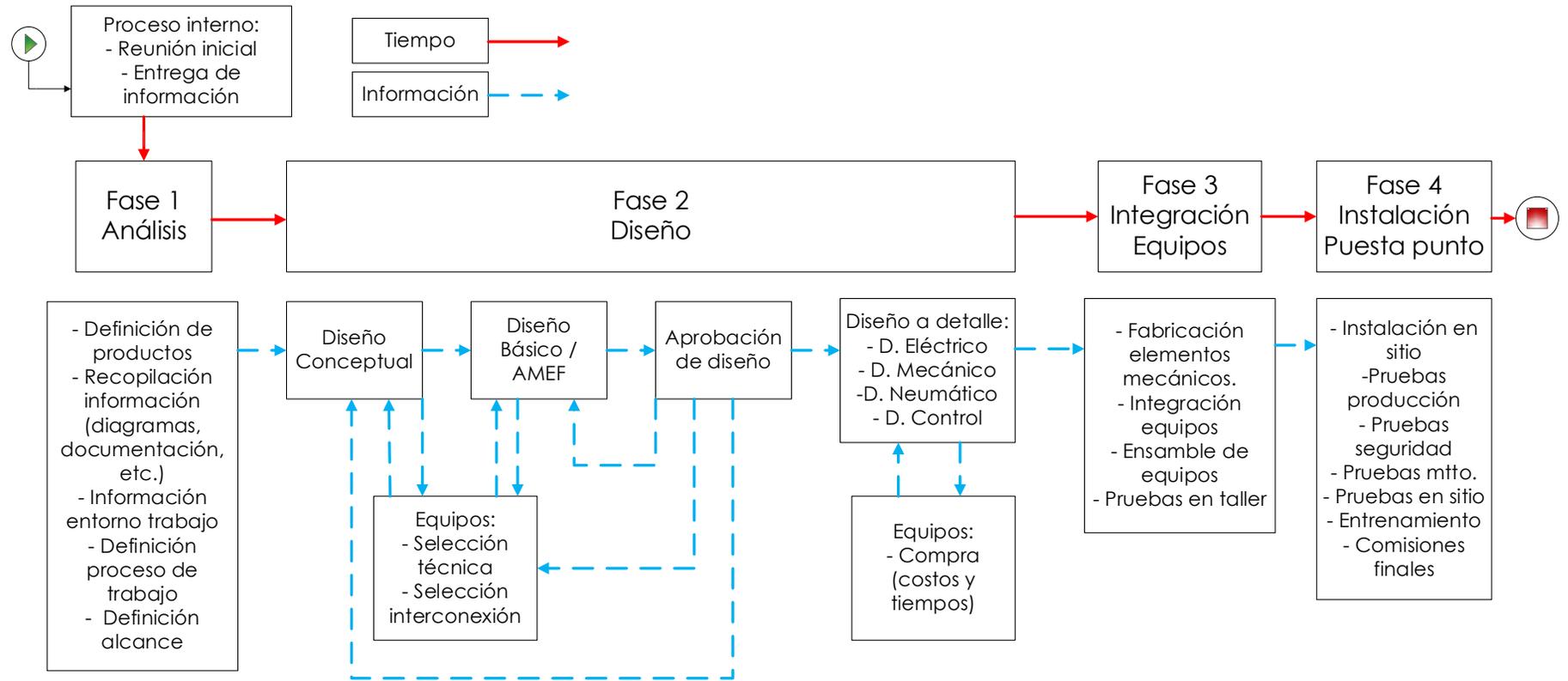


Figura 4. Esquema general de proyectos  
Elaboración propia

Total Productive Maintenance) (Powell 2018)(Nakeenopakun and Aue-U-lan 2019)(Veres et al. 2018).

La metodología Kanban apoya la mejora del flujo y lotes producción, ya que se enfoca en realizar lotes de pequeños tamaños y eliminación de desperdicios. Actualmente se tiene la facilidad de poder transportar la información que se generaba de manera clásica de tarjetas Kanban a una pizarra de seguimiento de producción o a una base de datos. También es de gran uso ya que da una forma visual para el control de producción (Powell 2018).

El tiempo de elaboración de los productos es un factor de alto interés para las empresas manufactureras, ya que no se ve reflejado en el producto final pero si los costos del proceso el cual aumenta el precio a cliente final. Esta fue la motivación para el desarrollo de la metodología SMED, la cual ha tomado gran significado y uso en las empresas manufactureras, ya que tiene como objetivo reducir los tiempos de inactividad o espera de maquinaria (Nakeenopakun and Aue-U-lan 2019).

El proceso SMED se da en tres etapas en donde se identifican las actividades internas y externas, consecuente se analizan las actividades para cambiarlas de internas a externas y por último se minimizan las actividades externas. Las actividades en cambios de modelos son fallas en maquinaria o herramientas, cambios en secuencias o rutas del proceso de producción, cambios de equipos y mantenimiento (Brito et al. 2017) en la Figura 5 se muestra los pasos del SMED.

En conjunto a la metodología SMED se tiene que tomar en cuenta que cualquier maquinaria o equipo tiene una vida útil, la cual puede sufrir incremento o decremento dependiendo del mantenimiento que se lleve a cabo en sus componentes de desgaste. Por esta razón, la metodología TPM plantea el mantenimiento preventivo y predictivo autónomo en maquinaria e instalaciones. TPM permite obtener altos estándares de eficiencia en tiempos muertos debido al mantenimiento, tratando de evitar el mantenimiento correctivo (Oliveira, Sá, and Fernandes 2017).

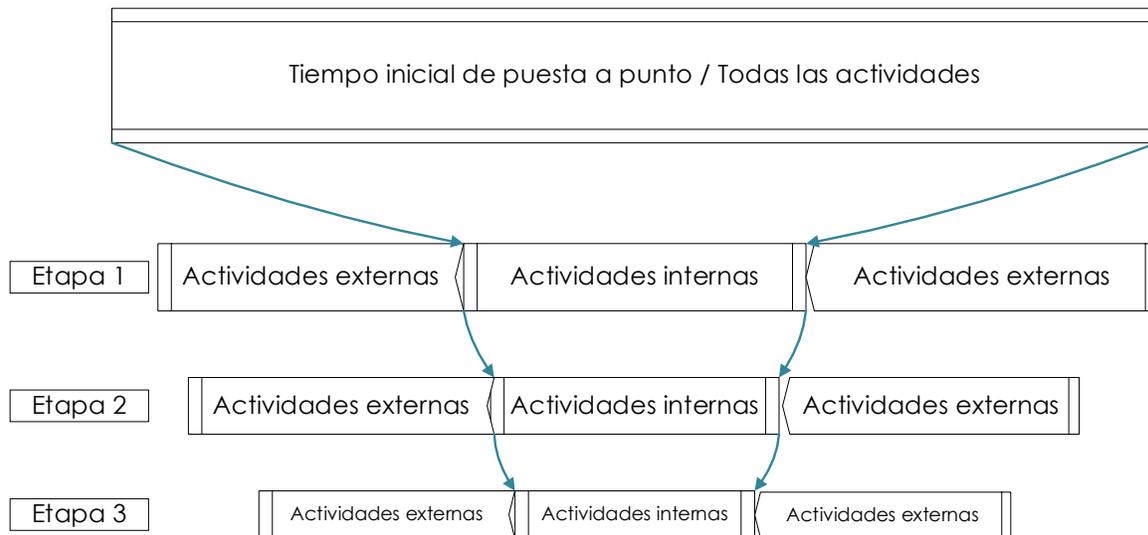


Figura 5. Etapas SMED  
(Brito et al. 2017)

Para poder mantener la maquinaria y áreas de trabajo en óptimas condiciones para el uso continuo es necesario tener orden y limpieza, para ello se implementa la metodología llamada 5's. Esta metodología tiene como objetivo mantener el área de trabajo limpia, eficiente y segura, manejando cinco pasos que toman sus nombres del idioma japonés (Veres et al. 2018): Seiri (Seleccionar), Seiton (Organizar), Seiso (Limpiar), Seiketsu (Estandarizar) y Shitsuke (Seguimiento). Para su implementación no se requieren equipos, tecnologías ni conocimientos especializados solo es requerida disciplina y autocontrol. Varios autores (Nakeenopakun and Aue-U-lan 2019) identifican que la organización bien aplicada da como resultado el bajo tiempo en operación como es la búsqueda de herramientas en menor tiempo a 30 s.

### 2.3.3. Ingeniería de control

Las principales características de un sistema flexible de manufactura es realizar cambios físicos y reconfiguración rápida de software, por lo tanto, el nivel de la arquitectura del control es un sistema híbrido basado en donde se coordinan recursos físicos, secuencias de trabajo y equipos (dispositivos) involucrados en el proceso.

Tradicionalmente se definen dos tipos de modelos para el control de los equipos en la maquinaria. Una estructura jerárquica, en el cual se asigna un nivel a los equipos y se realiza una pirámide donde se colocan, dando como resultado equipos denominados maestros y esclavos. Por otro lado, se tiene una estructura denominada heterárquica

donde se asigna el mismo nivel a todos los equipos, teniendo una autonomía y cooperación para el desarrollo de los objetivos.

Para el desarrollo de un sistema flexible de manufactura se propone la estructura denominada holónica, la cual hace una combinación de las dos estructuras antes mencionadas. En ella las tareas de control se distribuyen entre "Holons" que se definen como elementos autónomos – cooperativos y físicos – lógicos, que recolectan información de los equipos y ambiente de trabajo. Uno de los grandes beneficios es que pueden generar otros Holons, ya que su organización es dinámica y automática dando lugar a la adaptación del sistema en cambios de modelo (Chacón and Indriago 2010)(Querol et al. 2015).

### **2.3.4. Diseño mecánico**

Se tienen diferentes ramas en el estudio de la ingeniería mecánica ya que algunos autores difieren en las ramas que puedan englobar esta materia, en ella se pueden generalizar en dos grandes ramas; una donde se reúne las ciencias térmicas y de fluidos mientras que en su complemento está el diseño mecánico.

En el estudio térmico se puede encontrar aplicaciones de refrigeración, calefacción, así como sistemas de ventilación aplicados. En conjunto del estudio de generación de energía por medio de ciclos termodinámicos. Y en la parte de fluidos podemos encontrar nuevas tecnologías para la generación de energía renovables y no renovables mediante fluidos. Mientras que en el complemento de diseño mecánico se pueden encontrar estudios en estática, dinámica, resistencia de materiales, vibraciones mecánicas, estudios y cálculos de estructuras y mecanismos.

#### **2.3.4.1. Tecnologías de apoyo en diseño mecánico**

Actualmente la ingeniería mecánica es apoyada con diferentes herramientas de ayuda computacionales, estas son usadas simultáneamente para diseñar y analizar modelos 3D. Identifica la mejor combinación de parámetros geométricos para optimizar el modelado, análisis y uso de materiales (Park and Dang 2010).

La introducción de estas herramientas se da a partir de las décadas de los años 80's del siglo pasado, en donde industrias manufactureras focalizaron los beneficios de implementación reduciendo los tiempos en diseño, análisis y manufactura de productos con ello se elevó la calidad de producto y redujo los costos finales. Todo esto con la ayuda de software y reglas de diseño que sean acordes a ingeniería, diseño y manufactura (Anza et al. 2012)(Ali et al. 2013).

Los diseñadores prefieren desarrollar directamente en ambientes 3D mediante software CAD (por las siglas en inglés de Computer Aided Design), de la misma manera que diseños en 2D con el fin de comunicar y plasmar ideas de una manera rápida y virtualmente legible, con apertura a cambios rápidos y bajos costos (Qin, Prieto, and Wright 2008). Aunado al diseño CAD se tienen aplicaciones de ingeniería o análisis CAE (por las siglas en inglés de Computer Aided Engineering), fabricación CAM (por las siglas en inglés de Computer Aided Manufacturing) y gestión de datos de productos PDM (por las siglas en inglés de Product Data Management) es SolidWorks® desarrollado por la compañía Dassault Systèmes y uno de los principales para la generación de 3D mecánico en el sistema operativo Windows, al ser una herramienta automatizada. De igual manera ANSYS® es una plataforma basada en software que permite realizar el análisis por medio de la técnica de elementos finitos, con el cual se puede calcular y analizar estructuras, propiedades térmicas, fluidos, electromagnetismo entre otros fenómenos físicos todo esto desde la importación de modelos CAD (Zhang, Li, and Li 2009).

El proceso de desarrollo de producto hoy en día tiene como fundamento el uso de modelado CAD – CAE, en donde el modelo CAD es la entrada de datos del análisis de igual manera son las geometrías utilizadas para el análisis de elementos finitos. Estas geometrías están centralizadas en datos, elementos y parámetros que son requisitos para homogenizar los modelos 3D como un modelo común de datos CDM (de las siglas en inglés de Common Data Model) (Gujarathi and Ma 2011).

En las últimas décadas estas tecnologías y herramientas se han desarrollado a la par de sistemas de manufactura generando nuevas técnicas de apoyo como es lo que hoy conocemos como prototipado rápido y la ingeniería inversa donde en esta última es

acostumbrado la recolección de datos para generar modelos 3D mediante el uso de máquinas de medición de coordenadas CMM (de las siglas en inglés de Coordinate Measuring Machine), escáner laser y otros medios de digitalizar o crear nubes de puntos (Lin and Kuo 2009) (Matta, Raju, and Suman 2015).

Como se comenta en (Stanistreet, Allwood, and Willoughby 2006), el diseño de la maquinaria y equipos que conforman un sistema flexible de manufactura debe cumplir con ciertos requerimientos, dependiendo del tipo de producto a manufacturar. Generalmente estará integrada por módulos estándar para realizar el trabajo requerido. Adicionalmente es necesario realizar el análisis de ciclo de vida para fincar la optimización futura (Cai and Lai 2021).

También el diseño deberá contener diferentes perspectivas: diseño de producto, el cual involucra la estética componentes y forma de la estación máquina o producto; diseño de manufactura, en donde se mide la capacidad de manufactura es de importancia universal debido a que se enfoca directo a los costos de manufactura y diseño de mantenimiento, en donde se piensa el cómo se realizara el mantenimiento preventivo y correctivo en la etapa de diseño. (Karl T. Ulrich and Eppinger 2004). Deberá de tomarse en cuenta la disposición de los soportes de pieza conocidos por su nombre en inglés de "fixture", ya que estos son usados para mantener partes seguras en la correcta posición en una herramienta, así como de calibradores, herramientas y/o nidos utilizados durante su manufactura, ensamble o inspección (The American Society of Mechanical Engineers 2003).

Una vez formado el diseño 3D da paso a lo que algunos autores llaman dibujos 2D, dibujos técnicos o ingeniería a detalle, el cual es un documento compuesto de imagen, palabras, números y símbolos que comunican información acerca de una pieza a todos sus usuarios; así también puede transmitir a todos los departamentos de producción las consideraciones técnicas de fabricación (Chevalier and Domingo Padrol 1997).

Aquí es donde se plasman los componentes a maquinar en forma 2D. En estos dibujos se tienen todas las consideraciones del dibujo, así como son las acotaciones necesarias, dimensiones tolerancias geométricas, tolerancias de ajustes, formato de hoja, vistas

ortogonales necesarias y los procesos adicionales necesarios todo esto bajo la Norma ASME Y14.5 ya que es bajo esta norma que se rige el cliente.

Dentro de los dibujos 2D se pueden encontrar las siguientes características: acotación, proceso de anotar, mediante líneas, cifras, signos y símbolos medidas de algún dibujo o componente; dimensión, valor numérico o expresión matemática en unidades apropiadas de medida usada para definir forma, tamaño orientación de una parte o característica; tolerancia, valor total que puede variar una dimensión por esto la tolerancia es la diferencia entre el límite máximo y el mínimo; dimensiones básicas, dimensión teóricamente exacta sin tolerancias cuando se utiliza en conjunto con tolerancias geométricas, la dimensión básica, localiza el centro exacto de la zona de tolerancia; cuadro de control, es usado en conjunto con las dimensiones básicas contiene el control de una de las características, es considerado una caja de instrucciones en la cual se especifican los requerimientos de dicha característica; tolerancia geométrica, termino general para la categoría de tolerancias usadas para el control de tamaño, forma, perfil, orientación y locación; dimensiones de referencia, dimensión sin tolerancia solamente se toma como una referencia la cual no es de suma importancia (Mechanical and Engineers 2009).

#### **2.3.4.2. Ajustes y tolerancias geométricas**

Actualmente las tendencias de flexibilidad en procesos de manufactura enfocan a la variedad y personalización de producto, enfocándose a sistemas reconfigurables y ágiles en los cuales destacan las familias de partes y partes compuestas, por lo tanto, se muestra la necesidad de generar piezas o productos de alta calidad. En el diseño de producto manufacturado en sus modalidades de pieza o ensamble mecánico, entendiendo este como el conjunto de piezas y elementos conectados entre sí por juntas mecánicas, es necesario la introducción de ajustes y tolerancias para obtener una repetibilidad geométrica con el fin de obtener una estandarización de productos (Jbira et al. 2017)(Rameau, Serré, and Moinet 2018)(Anwer et al. 2020).

En la práctica tradicional los principales enfoques del diseño de productos manufacturados son la funcionalidad final, proceso de manufactura a utilizar y tecnologías a utilizar. Para mejorar la productividad de los productos se implican

procesos de ajustes y tolerancias desde el diseño de estos, aunque se han introducido numerosos estudios en esta área no se tiene un método que rijan todos los aspectos de los productos manufacturados (Armillotta 2013) (Mansuy, Giordano, and Hernandez 2011).

La definición de tolerancias es significativa en las etapas de la ciclo de vida del producto ya que se enfoca desde producción, gestión de calidad y uso. Las tolerancias geométricas marcan los puntos en los que puede diferir una característica de su valor ideal cumpliendo con los requisitos definidos. Inicialmente se tenían Tolerancias Dimensionales o Lineales, pero al pasar de los años se introdujeron nuevos controles llamados Dimensionado Geométrico y Tolerancia (por sus siglas en GD&T) donde los ajustes y tolerancias no solo se enfocan en ajustes de tamaño y posición, estas toman características geométricas individualmente o en conjunción como son: tamaño, forma orientación, ubicación, perfil y desviación (Armillotta 2013) (Hoffman and Gröger 2019).

Este nuevo enfoque conlleva a que los usuarios deben familiarizarse con todos y cada uno de ajustes y tolerancias que pueda tener una característica geométrica, dependiendo el elemento evaluado se pueden tener diferentes métodos evaluado los siguientes requisitos: tolerancias dimensionales, posicionales, de orientación y de forma, planificación del proceso de ensamblaje, tipos de contacto, movimiento del ensamblaje y simular las influencias de las tolerancias con respecto a los requisitos funcionales. En donde estándares internacionales proveen un lenguaje común para usuarios ISO / ASME (Armillotta 2013) (Qureshi et al. 2012) (Jbira et al. 2017) (Pierre, Rouetbi, and Anselmetti 2018).

Aunque se tienen herramientas CAD, estos datos y modelos geométricos son teóricamente perfectos y su geometría se basa en dimensiones nominales segregando tolerancias dimensionales y geométricas. Para ello el apoyo de herramientas computacionales que ayudan al cálculo de ajustes y tolerancias teniendo un resultado estadístico y límites de variación, sin embargo, estas toman un modelo infinitamente rígido y no se adaptan a problemas más robustos en donde dependan fundamentalmente de efectos de fuerzas externas e internas. También existen sistemas de especificaciones geométricas de producto y con base en estas se desarrollan

métodos y herramientas para el dimensionamiento, ajuste y tolerancia geométrica (Hoffman and Gröger 2019)(Mazur, Leary, and Subic 2011)(Gust and Schluer 2013)(Pierre, Rouetbi, and Anselmetti 2018).

### **2.3.4.3. Otras consideraciones**

En cuanto a los equipos a seleccionar tales como los actuadores neumáticos, se debe tener ciertas características principales como dimensiones, peso adecuado, bajo consumo de energía, alta efectividad (par / torque), control sencillo, respuesta rápida y operación silenciosa. Para cualquier tipo de actuador neumático estas son las principales consideraciones pero en casos especiales se pueden variar estas características (Vázquez, Uribe, and Cuevas 2014).

Otra consideración a tomar en cuenta, y que en muchas ocasiones se deja de lado es el ambiente en el cual se encuentra la planta de la empresa cliente, es de gran interés saber los factores ambientales para diseñar un ciclo de vida óptimo. Así mismo, para el desarrollo de una máquina flexible se deben contemplar el uso materiales y equipos comerciales con propiedades similares. Igualmente se debe contemplar la introducción de herramientas que permitan en un futuro la introducción de nuevos modelos (Stanistreet, Allwood, and Willoughby 2006).

### **2.3.5. Ergonomía**

En el caso de un sistema semiautomatizado se generan trabajos repetitivos con alta frecuencia, estos trabajos dejan residuos de estragos, fuerzas aplicadas y estresantes posturas para el cuerpo humano durante la jornada laboral. A un largo plazo estos pequeños residuos pueden generar daños musculo-esqueléticos en el trabajador. Por lo tanto, el diseño de este tipo de sistemas, se apoya de normativas y equipos de carácter útil para salvaguardar la integridad física de los trabajadores (Brito et al. 2017).

El concepto de ergonomía se introduce como el estudio de formar espacios de trabajo, herramientas y equipos adecuados a los trabajadores tratando de reducir los riesgos musculo esqueléticos(Warren 2004). Por lo tanto, hablar de ergonomía es entrar en un área multidisciplinaria y que es utilizada en ámbitos industriales y no industriales con el objetivo de optimizar la seguridad (equipos y usuarios), salud y productividad de los

usuarios correspondiente a los trabajadores usuarios; tomando en cuenta factores de ergonomía, accesibilidad y alcance (Mgbemena et al. 2020).

### **3. PROCEDIMIENTO**

La implementación de sistemas flexibles puede darse en todos los rubros y ámbitos de industria de productos y servicios, tratando de ser redituables o el retorno de inversión sea a cortos plazo. Para ello la primera inversión es una máquina flexible en donde se trabajarán modelos de baja producción, estos son de familias similares que llevan en conjunto esta baja producción a una media producción.

En este capítulo se describe el proceso llevado a cabo para el diseño e integración del banco flexible motivo del presente trabajo el cual está basado en la secuencia propuesta en el esquema de la Figura 4 del Capítulo, en: Fase 1 Análisis de requerimientos y recolección de datos, Fase 2 Diseño, Fase 3 Montaje e integración de equipos en banco de calibración. La Fase 4 correspondiente a Instalación y puesta a punto se tratará en el Capítulo 4. Cabe recordar que es importante dar seguimiento a la fabricación de la ingeniería final sin perder de vista dichas fases de gestión (Villanueva and Watanave 1994).

En el caso específico del proyecto realizado, los parámetros considerados para la fijación de la ruta a seguir fueron: necesidades de cliente, presupuesto, vida útil, ambiente, volumen producción, tipos de tecnología a utilizar, mantenimiento, nivel de automatización, nivel de seguridad, ergonomía; por estas características se tiene una ruta personalizada seguida comúnmente en proyectos de automatización (Arriaga, Cabrera, and Gutiérrez 2019).

#### **3.1. FASE 1: ANÁLISIS DE REQUERIMIENTOS Y RECOLECCIÓN DE DATOS**

El requerimiento del cliente es un banco de calibración semiautomático que en un corto plazo pueda realizar la calibración y verificación final del funcionamiento de cuatro modelos de turbocargadores que se usan en el sistema de escape de un motor de combustión interna de los cuales se realiza una producción media y/o baja. A mediano plazo se requiere que en dicho banco de pruebas puedan introducirse un mayor número de modelos. A un largo plazo se considera implementar la trazabilidad de los productos individuales (impresión de código QR), la automatización completa de la prueba, así como la interconexión del banco al sistema computacional instalado en planta, para lograr la integración de información en él.

### 3.1.1. Requerimiento de cliente

El banco de calibración debe de tomar en cuenta todas las variables que están en su entorno de trabajo en conjunto con normativas nacionales e internacionales; así mismo se deberá considerar el manejo de materiales, movimientos de operadores, modos de operación, transporte, servicios (energías y mantenimiento). Las principales a considerar y que serán realizados por la empresa cliente y/o verificados por una empresa externa contratada por el mismo cliente se enlistan a continuación:

1. Análisis de riesgo en tres etapas por empresa dedicada al servicio (PILZ):  
diseño, fabricación e instalación
2. Diseño Mecánico bajo normativa ASMEY14.5M
3. Diseño Neumático (Análisis de Riesgo Diseño)
4. Tiempo de vida útil de máquina 10 años
5. Alimentación neumática considerar válvulas con sistema LOTO
6. Tiempo ciclo estimado >23 piezas por hora (2.6 min por pieza máximo)
7. Los cambios de modelo deberán de ser <10 min para equipos
8. Uso de Poka – Yoke
9. Interconexión a sistema existente en planta y generación de señal ANDON

Adicionalmente se debe cumplir con la Normativa internacional:

1. 2006/42/EC: Machine Directive
2. 2006/95/EC: Low voltage Directive
3. 2004/108/EC: Electromagnetic compatibility Directive
4. 99/92/EC: ATEX
5. 2013/35/EC: Exposure of workers to the risks arising from physical agents (electromagnetic fields)
6. EN ISO 12100:2010: Safety of machinery – General principles for design – Risk assessment and risk reduction
7. EN 1037: Safety of machinery – prevention of unexpected start-up
8. EN 1088: Safety of machinery – interlocking devices associated with guards – principles for design & selection
9. EN 12464-1: Light and Lighting. Lighting of workplace. Part1: indoor work places
10. EN 1837: Integral lighting of machines

11. EN 349: Safety of machinery - Minimum gaps to avoid crushing of parts of the human body
12. EN 547: Safety of machinery – Human body measurements
13. EN 574: Two start buttons or light curtain
14. EN 60204-1: Machinery safety – Electric equipment of machines – general requirements
15. EN 614: Safety of machinery – Ergonomic design principles
16. EN 61496: Safety of machinery – Electro-sensitive protective equipment – Part1: General requirements and tests
17. EN 62061: Safety of machinery – functional safety of safety related electrical, electronic and programmable electronic control systems
18. EN 894: Safety of machinery – Ergonomic requirements
19. EN 953: Safety of machinery - Guards - General requirements for the design and construction of fixed and movable guards
20. EN ISO 13732: Ergonomics of the thermal environment - Methods for the assessment of human responses to contact with surfaces
21. EN ISO 13850: Emergency stop
22. EN ISO 13855: Safety of machinery – positioning of safeguards with respect to the approach speeds of parts of the human body
23. EN ISO 13857: Safety of machinery — Safety distances to prevent hazard zones being reached by upper and lower limbs
24. EN ISO 14738: Safety of machinery – anthropometric requirements for the design of workstations at machinery
25. EN ISO 4414: Pneumatic fluid power – general rules of safety requirements for systems and their components
26. ISO 13849-1: Safety of machinery – Safety related parts of control systems
27. EN ISO 10218-1: Robots and robotic devices - Safety requirements for industrial robots
28. EN 60825-1: Safety of laser products
29. IEC 60204-1: Safety of machinery – Electrical equipment of machines

En cuanto a la normativa de la legislación mexicana se debe cumplir con las normas:

1. NOM-004-STPS-1999: Sistemas de protección y dispositivos de seguridad en la maquinaria y equipo que se utilice en los centros de trabajo
2. NOM-029-STPS-2005: Mantenimiento de las instalaciones eléctricas en los centros de trabajo-Condicionales de seguridad
3. NOM-026-STPS-2008: Colores y señales de seguridad e higiene, e identificación de riesgos por fluidos conducidos en tuberías

En cuanto a salud, seguridad y requerimientos ambientales se contempla el control de riesgos en el uso de dispositivos (guardas) así como la instalación señales de precaución.

En la parte de requisitos ergonómicos se debe considerar:

1. Diseño para minimizar fatiga de operadores, movimientos de cadera laterales, movimientos laterales rígidos.
2. En manera de lo posible mantener una posición ergonómica neutra durante el ciclo.
3. Herramientales, nidos, dispositivos deben tener peso apropiado de 3 kg máximo: para todo equipo de rutina y de 12 kg máximo para todo equipo de NO rutina.
4. Todos los paneles (HMI) deberán estar posicionados al nivel de ojos
5. Considerar promedio de alturas para hombres y mujeres dependiendo la región
6. Cambios de modelos a realizar en herramientas deberán ser posible que lo realice el operador

Las condiciones ambientales también son tomadas en cuenta, ya que a zona geográfica donde estará instalado el banco de pruebas es un área con clima desértico, por lo que es necesario el uso de sistemas de aire acondicionado en la planta, que pueden ocasionar condensación de líquidos que afectan a los componentes de maquinaria y equipos.

Otra consideración importante es el servicio de energías. Los servicios que se tienen en el entorno de trabajo en el caso de energía eléctrica es un suministro de 110V / 220V /

440V, en la parte electro-neumática se tienen dos líneas de alimentación de aire a presión 7 bar y 12 bar. En el caso de energía hidráulica no se tiene contemplado ningún equipo por lo que no se considera en las instalaciones de servicio.

En el caso de los servicios de mantenimiento debido al estándar manejado por el departamento que presta este servicio y con el fin de mantener dicho estándar se requiere el uso de equipos y tecnologías autorizadas y que tengan el cumplimiento de estándares internos, interconexión y marcas comerciales. Junto con listado de equipos y dibujos de piezas de desgaste en conjunto de tiempos.

### **3.1.2. Análisis morfológico y definición de familia de partes**

Dado que se propone manejar más de un modelo en el banco de pruebas y calibración del componente del turbocargador, se considera posible la implementación de un sistema flexible buscando que sea redituable y con retorno de inversión a corto plazo. Por esta razón es necesario generar una familia de partes en base a las características de los modelos a manejar tanto actualmente como un futuro próximo.

En la primera etapa del proyecto se tienen cuatro modelos de turbocargadores diferentes, existiendo únicamente dos tipos de diafragmas en los cuales la diferencia entre los modelos es la ubicación geométrica de la conexión electro-neumática. Inicialmente se realizó un análisis de las operaciones que se deberán llevar a cabo en el banco de calibración. En las Figuras 6 y 7 se muestran dos de los componentes a calibrar, en los cuales se muestra la disposición de operaciones a llevar a cabo. Inicialmente se asegura el ensamble mediante la instalación y aplicación de torque en dos tuercas marcado como a), se realiza el ajuste de la longitud preestablecida marcada como b), se coloca conector de entrada a cámara de diafragma para inyección de aire a presión positiva y/o negativa marcada como c), se realiza la aplicación de torque y resina en tuerca para la fijación de la longitud preestablecida marcada como d) y por último se instala un seguro track para fijar el vástago tal como se indica en e).

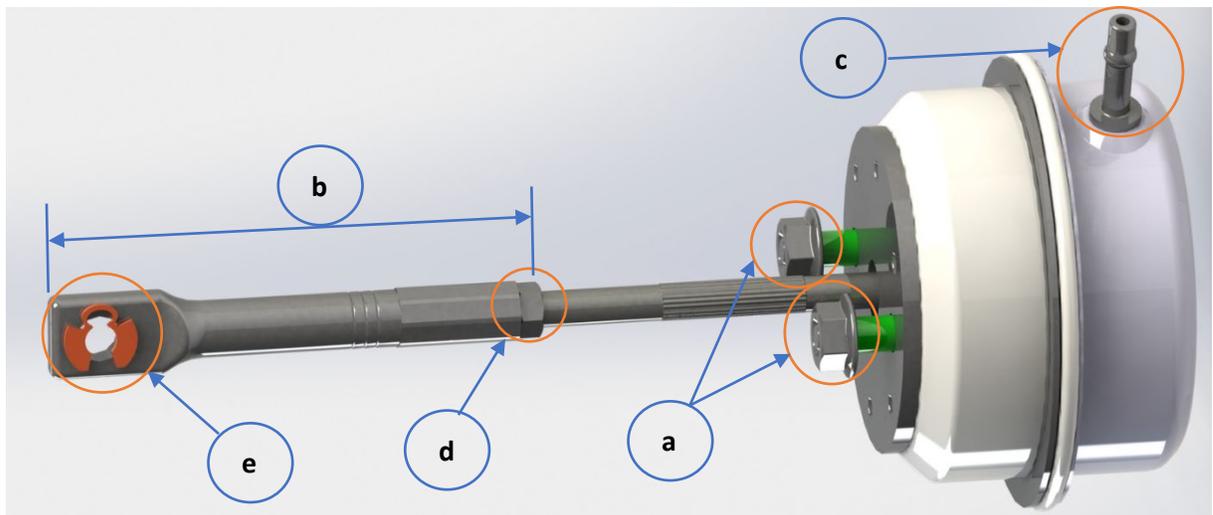


Figura 6. Operaciones de prueba y calibración modelo A  
Elaboración propia

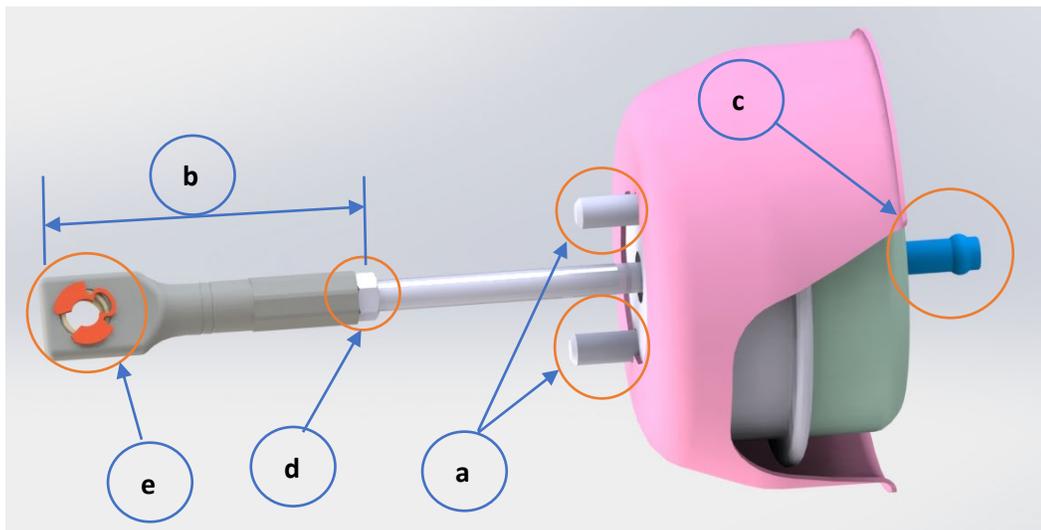


Figura 7. Operaciones de prueba y calibración modelo B  
Elaboración propia

Partiendo de que todos los modelos deberán estar en la misma posición dentro del banco de calibración, al trasponerse se tendrá como resultado la disposición mostrada en las Figuras 8 y 9, en donde se toma como "cero piezas" la sección lateral de punta del vástago marcada como a) ya que es el lugar en el cual se detecta el ajuste de longitud.

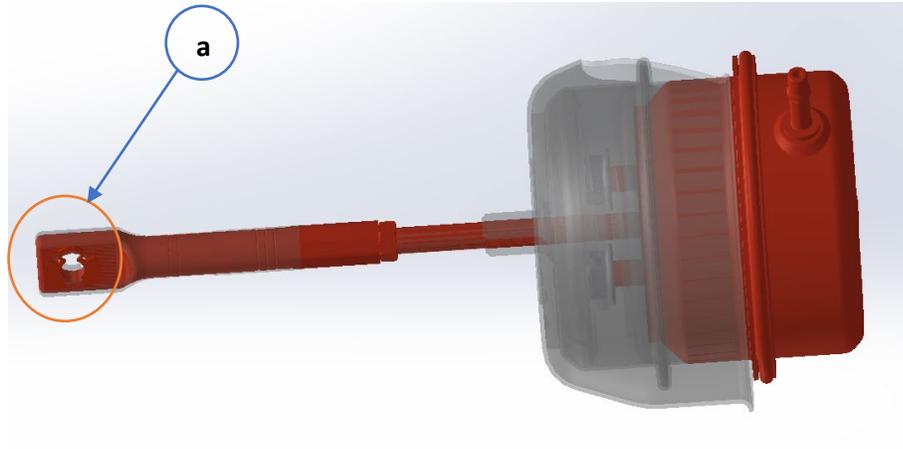


Figura 8. "Cero Pieza" modelo A  
Elaboración propia

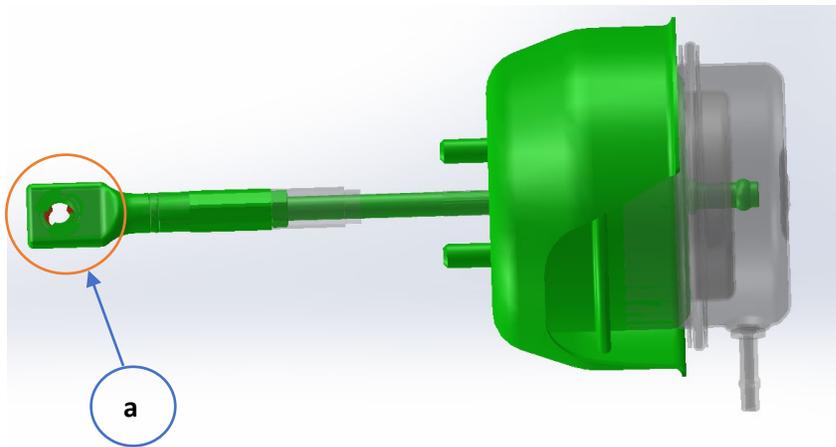


Figura 9. "Cero Pieza" modelo B  
Elaboración propia

Una vez realizado el análisis de operaciones en los modelos es posible encontrar similitudes entre estas así como en las herramientas de uso y sus características geométricas, en base a las que podrá generarse la parte compuesta de la familia de partes.

Por la cantidad de modelos que se pueden introducir en el largo plazo, se toman dimensiones generales de la forma de estos, por lo tanto, el componente resultante es el mostrado en la Figura 10, ya que según se muestra todos los modelos pueden estar instalados en un área definida pero variable entre ellos. Por lo que se genera un "área de trabajo común", la cual tiene una forma cilíndrica de diámetro de 350 mm y una altura de 500 mm. Esta área está en torno al eje de rotación del componente.

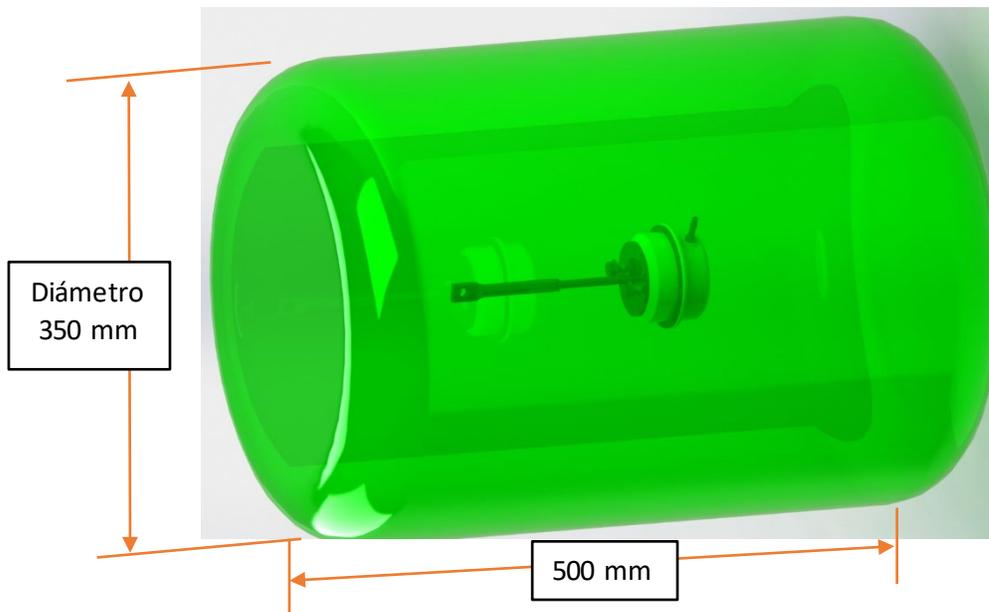


Figura 10. Área de trabajo común familia de partes  
Elaboración propia

### 3.1.3. Determinación de las funciones a realizar en el banco flexible de pruebas

El banco flexible de calibración debe tener la capacidad de realizar dos funciones principales: atornillado (Screwed) y calibración (Calibration) de los modelos, ya sea de forma separada o en secuencia, así como rutinas separadas para evaluar aquellos productos definidos como patrones maestros (Masters). En el caso de los patrones maestros se tienen tres tipos: a) patrón maestro de baja presión (Master Low), b) patrón maestro de alta presión (Master High), y c) patrón maestro de presión establecida (Master OK). El banco flexible de calibración debe implementar la característica de un secuenciador, es decir que se condicione la secuencia de ensamble por medio de un conjunto de "Pasos".

## 3.2. FASE 2: DISEÑO

Un tema principal en el desarrollo de un producto o bien técnico, es la selección de materiales ya que deben de corresponder a los estándares emitidos por la empresa cliente y a su vez deben tener concordancia con la funcionalidad. Las características principales son las propiedades físicas, tecnologías y equipos que sean acordes a función, utilización, modularidad, disponibilidad y resistencia al uso de todos ellos. Para ello se realiza la selección de equipos y materiales ideales, buscando un balance en lo requerido y lo otorgado ya que si este no cumple con expectativas son ineficientes, en

cambio si supera las expectativas podrían llegar a ser excesivos para la función requerida (Ferro and Bonollo 2019)(Ashby 2011) (DeGarmo, Temple Black, and Kohser 1988).

### 3.2.1. Diseño conceptual

La primera propuesta que se tiene como resultado de la recolección de datos en planta y un levantamiento realizado en sitio, es un prediseño en el cual se define el área de trabajo del banco de calibración tanto para el área de colocación de productos, como para la de operación, así como la relación con los equipos de proceso en la periferia. Como resultado se tiene la estructura que se muestra en la Figura 11.

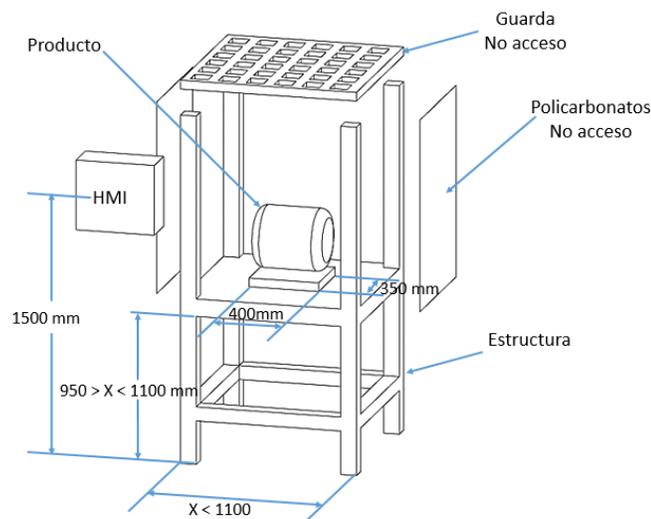


Figura 11. Diseño Conceptual General  
Elaboración propia

Dicha estructura está construida de perfil de aluminio. En ella se contemplan también las guardas de seguridad, panel HMI y la placa base para el intercambio de modelos.

Una vez realizado este diseño del área base, se procederá en función de los espacios y conforme las especificaciones del cliente a distribuir las áreas de: atornillador, conector neumático, modelo a probar, dispensador clips, gabinete eléctrico, herramienta torque, actuador neumático con un Transformador Diferencial de Variación Lineal LVDT (por las siglas en ingles de Linear Variable Differential Transformer), unidad manifold (distribuidor neumático), dispensador de resina y unidad de mantenimiento neumático entre otros.

### **3.2.2. Diseño a detalle**

Se describen a continuación las áreas, procesos y equipos utilizados en el banco flexible de calibración. Para llegar a los requisitos de la empresa cliente, se prioriza temas de seguridad, ergonomía, proceso y mantenimiento sin perder de vista los presupuestos marcados.

#### **3.2.2.1. Diseño estructural**

Este diseño es el resultado de las consideraciones de operaciones, normativas y materiales. La operación principal para definir la estructura es la carga del producto a someter a prueba, en la primera etapa se propone realizar manualmente, por lo cual tiene que dar oportunidad al operador de maniobrar el componente a decisión propia. En una segunda etapa donde se considera un sistema automatizado se deberán considerar las modificaciones necesarias dependiendo de las características de la tecnología a utilizar.

En cuestiones generales se obtiene el área en la cual todos los elementos participantes en el proceso quedan distribuidos de la mejor manera también los componentes deben de estar resguardados por alguna cubierta anticorrosiva, ya que estos recubrimientos tienen la finalidad de mejorar las propiedades físicas (Arellano 2019), por lo tanto, la estructura principal es diseñada en conjunto del requerimiento de perfil estructural de aluminio con una placa de acero galvanizado para utilizar como área de operación.

Otros parámetros a considerar en el diseño estructural son las cargas a manejar y alturas definidos a partir de las consideraciones de ergonomía según la normativas EN 547, EN 614, EN ISO 14738. Como anteriormente se indicó los rangos de peso para actividades de proceso (rutina) son tres kg máximo, mientras que para actividades fuera de proceso, tales como cambio de modelo, mantenimientos preventivos y mantenimientos correctivos menores son 12 kg máximo. También se considera la combinación de cargas y alturas para evitar la generación de movimientos repetitivos dañinos. En las Figuras 12 y 13, se muestran la vista frontal y planta indicando las dimensiones resultantes.

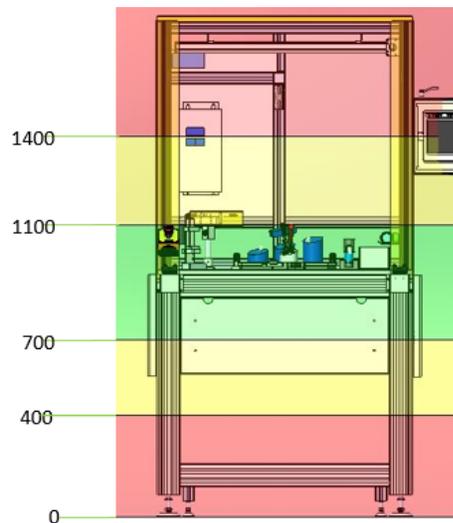


Figura 12. Diseño CAD alturas de carga  
Elaboración propia

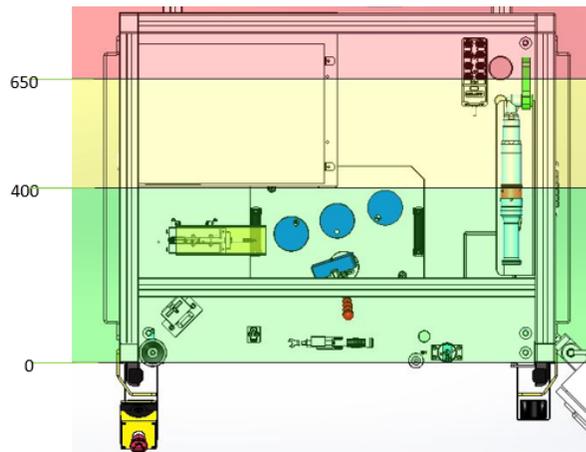


Figura 13. Diseño CAD distancia de carga  
Elaboración propia

El diseño de la estructura también es apoyado por parte de las normativas de seguridad requeridas tanto para el operador como para los equipos utilizados, ya que el proceso de calibración se realiza en base al movimiento creado por la introducción de aire a presión en el diafragma del producto. Debido a este movimiento, se debe restringir el acceso de la persona y sus extremidades al momento de realizar dicha operación, por lo que, el acceso al área de operación debe ser controlado y dirigido a la parte frontal mediante policarbonatos en sus laterales y reja en la parte superior, según muestra la Figura 14.

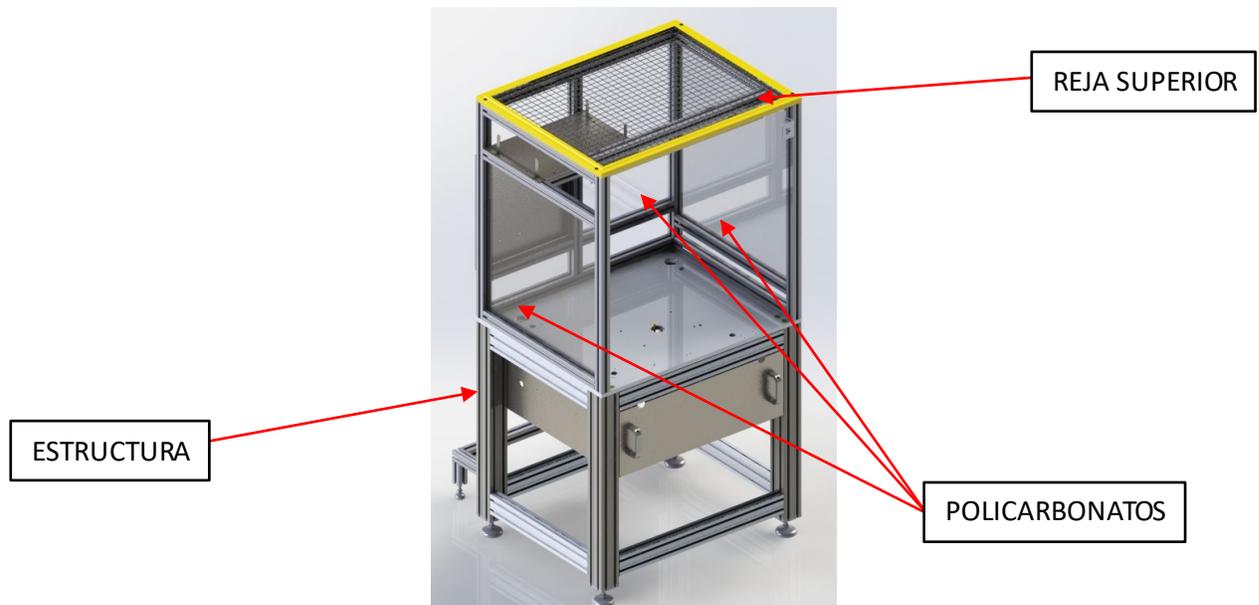


Figura 14. Diseño CAD componentes estructura  
Elaboración propia

### 3.2.2.2. Diseño de herramientas

Uno de los tiempos que se abordarán en el caso de la fabricación del banco flexible de calibración es el tiempo de puesta a punto (cambio de modelo), el cual se define como el periodo de tiempo entre la última pieza correcta de la orden de producción anterior y la primera pieza correcta de la siguiente orden de producción (Nakeenopakun and Aue-U-lan 2019).

Al hablar de optimización para la posterioridad se debe tomar en cuenta que futuros modelos del turbocargador tendrán cambios en la forma geométrica y procesos. Por lo tanto, el diseño del banco flexible de calibración debe ser apoyado por la metodología SMED, para realizar cambios y reconfiguraciones físicas del área de producción y herramientas utilizadas dentro de los procesos de prueba y calibración.

Esta metodología se centraliza en etapas, en la primera se agrupan los modelos, mientras que la segunda se determina el herramental a utilizar por el grupo antes formado (Nakeenopakun and Aue-U-lan 2019).

En una primera etapa los diferentes modelos de turbocargador se agruparon conforme las siguientes características: componente a calibrar, geometría del producto

(dimensiones generales), tecnología implementada (tipo de medición LVDT / atornillador / llave de torque manual), tipo de calibración (presión de aire positiva – negativa), y lugar de fabricación en planta.

La segunda etapa es realizada como un proceso interno de la empresa cliente, ya que los datos de volúmenes de producción información de carácter confidencial.

Otro punto importante que se consideró en el SMED fue la identificación de actividades internas y externas en el proceso de puesta a punto del banco flexible, para poder minimizar dichas actividades. La clasificación se basa en el siguiente criterio: a) Internas, actividades que toman tiempo para la puesta a punto del banco flexible mientras no está en funcionamiento / operación; y b) Externas, actividades que toman un periodo de tiempo antes y después de llevar a cabo el cambio del herramental. Con el fin de convertir las actividades internas en externas, se integraron dispositivos de tipo pokayokes que permiten llevar un cambio de herramientas coordinado y sincronizado para el fácil uso por trabajadores dedicados a esta actividad.

La tercera etapa definida en la metodología SMED no se aplicó en el proceso llevado a cabo por la naturaleza del mismo, dado que es un banco flexible de calibración nuevo se toman las consideraciones de la tercera etapa en el diseño del mismo.

### **3.2.2.3 Diseño neumático y electro-neumático**

La energía neumática usada en el banco flexible de calibración debe ser monitoreada y controlada para su uso eficiente y seguro, esto con el fin de evitar movimientos repentinos y fuerzas excesivas bajo las normativas ISO 4414 ISO 13849-1.

En conjunto a las normativas ISO 4414 IEC 60204-1 ISO 14118 el sistema al presurizarse y despresurizarse cumple con el indicador de presión y retroalimentación. De igual manera bajo la normativa IEC 60204-1 la desconexión de alimentación principal deberá estar posicionada en un rango de 0.6m a 1.9m

### 3.2.2.4 Diseño eléctrico

La ingeniería eléctrica conlleva tomar en cuenta todos y cada uno de los elementos que tengan necesidad de ser alimentados con energía eléctrica ya sea elemento de actuación o retroalimentación. Contemplando los requerimientos, seguridad y normativas, se realiza la distribución y conexión de todos los elementos eléctricos.

Aunado a lo anterior, debido a que la acumulación de energía estática en el dispositivo de bloqueo eléctrico puede resultar en una descarga eléctrica o provocar un movimiento inesperado que puede causar desde lesiones hasta una fatalidad individual, es necesario incorporar un sistema de protección y tierra física.

Los dispositivos utilizados tienen las siguientes características:

1. Dispositivo de desconexión que cumpla con IEC 60204-1. Dicha norma es aplicable a las características de la conexión de alimentación de equipos eléctricos y electrónicos.
2. Este dispositivo deberá permitir su bloqueo en la posición de "OFF" (Apagado).
3. Etiquetar el dispositivo de manera adecuada para su clara identificación.
4. Las instrucciones de uso deberán incluir la información del proceso de bloqueo de energías y disipación de energía residual.

El sistema de tierra física evita poner en peligro al personal cuando el tablero esta energizado, ya que pueden producirse fenómenos eléctricos con la posibilidad de una descarga a los operadores que realizan alguna actividad en ellos. De igual manera este sistema debe ir conectado a la tierra física de las instalaciones de la empresa cliente.

También es necesario realizar el etiquetado de todos los elementos dentro del gabinete eléctrico, ya que durante el desarrollo de actividades de mantenimiento puede conducir a que personal poco entrenado sufra confusión esto conlleva a cometer errores que pongan en riesgo la integridad del equipo y del personal.

Otro sistema eléctrico integrado son las cortinas de seguridad ópticas, las cuales son necesarias ya que debido a que el banco flexible será alimentado en la primera etapa de manera manual y por la parte frontal, no es viable colocar barreras físicas. En conjunto con estas cortinas se incorpora un botón táctil "Opto – Touch" que dará la señal para el

inicio de ciclo de operación. La conexión de estos elementos está debidamente instalada bajo las normativas ISO 13851 / ISO 13855.

Las cortinas de seguridad ópticas están ubicadas a una distancia mínima de seguridad entre el elemento que genera el movimiento y una barrera física que impide el acceso del operador dentro del banco flexible. Esta distancia se calcula mediante la relación dada en la Ecuación 1, con el fin de garantizar que el movimiento realizado en el área de operación no sea posible mientras algunas de las extremidades del operador estén dentro de ella.

$$S = (K * T) + C$$

Ecuación 1. Distancia mínima cortinas ópticas

En donde S es la distancia mínima desde punto de peligro a barrera de luz (mm), K es la velocidad de aproximación (mm/s), T es la sumatoria del tiempo total de paro (s) y C es la distancia adicional (mm) la cual depende del tipo de cortina utilizada. En el cálculo de T (tiempo total de paro) se contemplan los tiempos de reacción de todos los equipos de control y actuadores. En la Tabla 2 se muestran los equipos tomando en cuenta:

Los datos recolectados se muestran en las imágenes de sus hojas de datos respectivas en cada equipo y datos recolectados con proveedores Anexo A.

Tabla 2. Tiempos de equipos

	Cortinas seguridad	Relevador seguridad	PLC	Tablillas	Electroválvulas
	Enviar señal	Entrada / Salida	Entrada / Salida	Enviar señal	Corte de aire
Tiempo respuesta ms	18	44	5	10	40

Elaboración propia

### 3.2.2.5 Diseño del sistema de control

Como ya se mencionó el banco flexible realiza tanto funciones individuales o rutinas secuenciales. Por lo tanto, se deben implementar un programa de control con las

características de un secuenciador, es decir que se condicione la secuencia de ensamble por medio de un conjunto de "Pasos".

Esta serie de "Pasos" conocida normalmente como "Receta" se conforma de tres partes, la primera parte es informativa, la segunda es de entradas y la última de salidas. La parte Informativa contiene una breve descripción del paso a ejecutar. La parte de entradas contiene la serie de sensores de parte presente o de bits de control que se requieren para que se lleve a cabo la secuencia. En la parte de salidas se contienen aquellos bits que se emiten hacia los actuadores o sistemas conectados.

En la Figura 15 se muestra el diagrama de flujo general de la "Receta" a realizar por el banco flexible de pruebas, el cual determina todos los escenarios posibles de la secuencia.

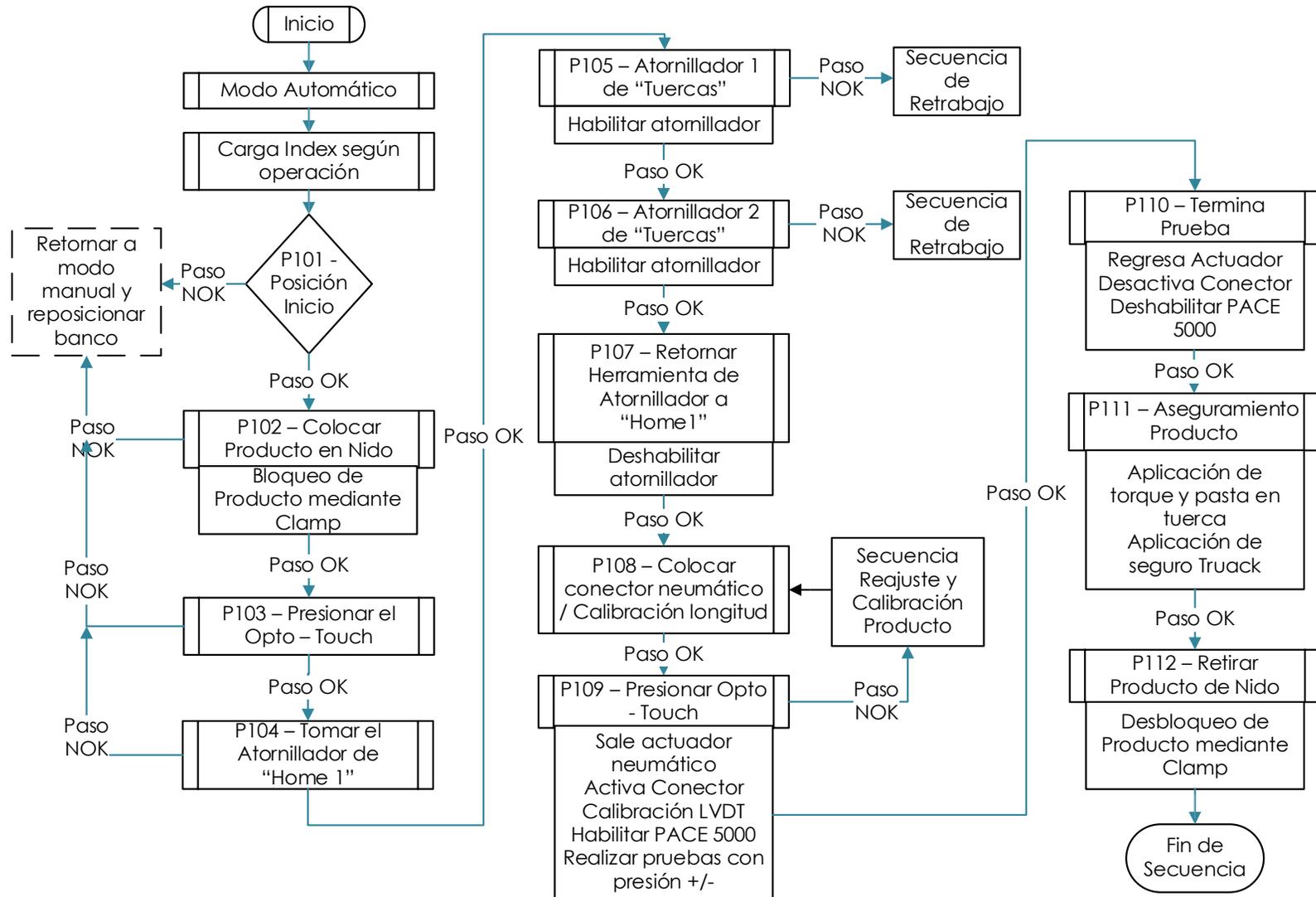


Figura 15. Diagrama de flujo general  
Elaboración propia

Para la ejecución cada paso se define:

1. Condiciones de entrada para que se realice: son los sensores y/o acciones que espera el secuenciador para poder seguir con el siguiente paso.
2. Paso correcto: es el paso que se ejecuta en caso de cumplir con las condiciones de entrada de paso correcto.
3. Las condiciones de paso incorrecto: son eventos extraordinarios programados dentro del PLC en respuesta a fallas de ejecución.
4. Paso incorrecto: es el paso correctivo en caso de cumplirse las condiciones de un paso incorrecto.

### **3.3. FASE 3: MONTAJE E INTEGRACIÓN DE EQUIPOS EN BANCO FLEXIBLE**

En esta fase se contemplan los equipos utilizados en los procesos del banco flexible de calibración, y sus características principales.

#### **3.3.1. Montaje y calibración de transductor LVDT**

El principal proceso del banco flexible es la calibración, mediante el uso de un transductor, de la longitud del vástago acoplado en el diafragma. Mediante la alimentación de la variación de la longitud a un sensor de tipo LVDT se obtiene una señal que se retroalimenta posteriormente a un controlador.

El LVDT es un transductor electromecánico de retroalimentación usado normalmente en mediciones de deformaciones axiales y radiales principalmente, mediante pulsaciones eléctricas generadas por el movimiento de un núcleo magnético interno cilíndrico con camisa de tres bobinas alrededor de este y separadas. El fenómeno se genera por la excitación de una de las bobinas con corriente alterna generando voltajes en las otras dos bobinas, finalmente se tiene como salida un diferencial de voltaje que deberá ser acondicionada. Las características principales de estos equipos son: alta precisión de 0.01 mm, baja histéresis, versatilidad de geometrías, estabilidad a cambios de presión y temperatura (Masi et al. 2014)(Santhosh and Roy 2017)(Chen et al. 2020).

En el banco a diseñar se tiene como referencia la superficie utilizada como “cero pieza” para detectar el cambio de posición respecto la calibración de aire presurizado con presión negativa o positiva. El diseño de herramientas incluye las dimensiones de ensamble de los modelos en su calibración como se muestra en la Figuras 16 y 17.

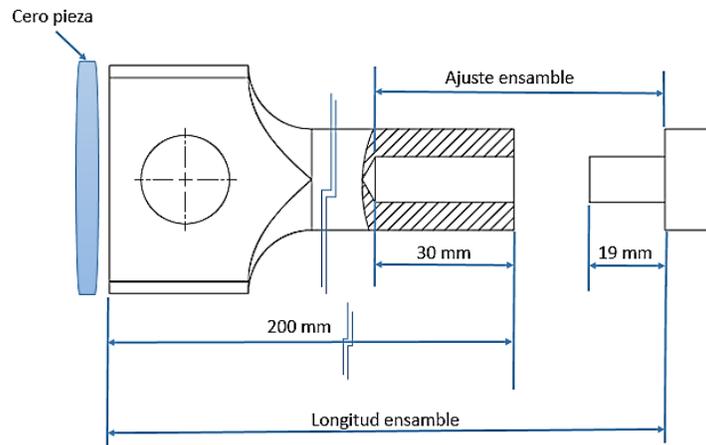


Figura 16. Diseño conceptual dimensiones de producto  
Elaboración propia

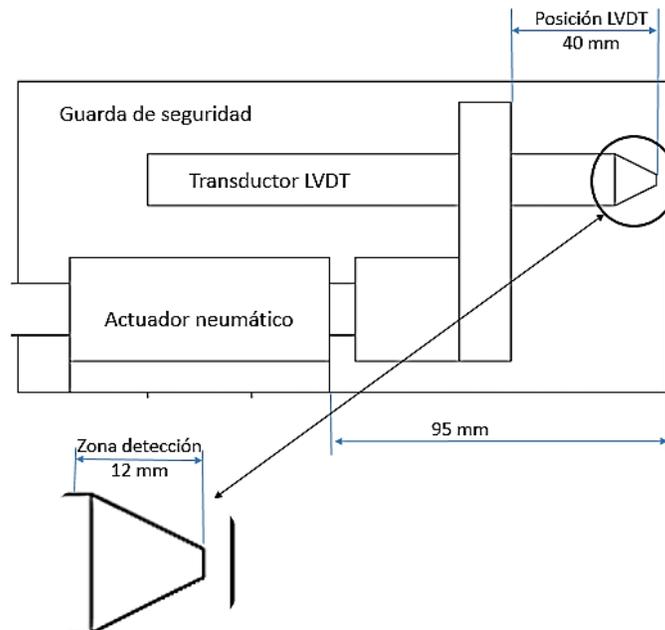


Figura 17. Diseño conceptual zona de detección  
Elaboración propia

En la Figura 18 también se muestra las consideraciones de montaje y zona de detección en el LVDT, en la cual es posible identificar: a) posición de montaje LVDT, b) carrera de actuador neumático, c) posición guarda fija con objetivo de salvaguardar LVDT al momento de cargar productos, d) distancia necesaria para la calibración de producto, e) distancia pre – ajustada del modelo y f) altura definida “base intercambio” y “cero pieza” tomando en cuenta el “área de trabajo”. En esta zona de detección se realiza un ajuste de corrección de cinco mm en el recorrido, para asegurar que el movimiento del vástago este dentro de la zona de detección en cualquier sentido que se dé su movimiento.

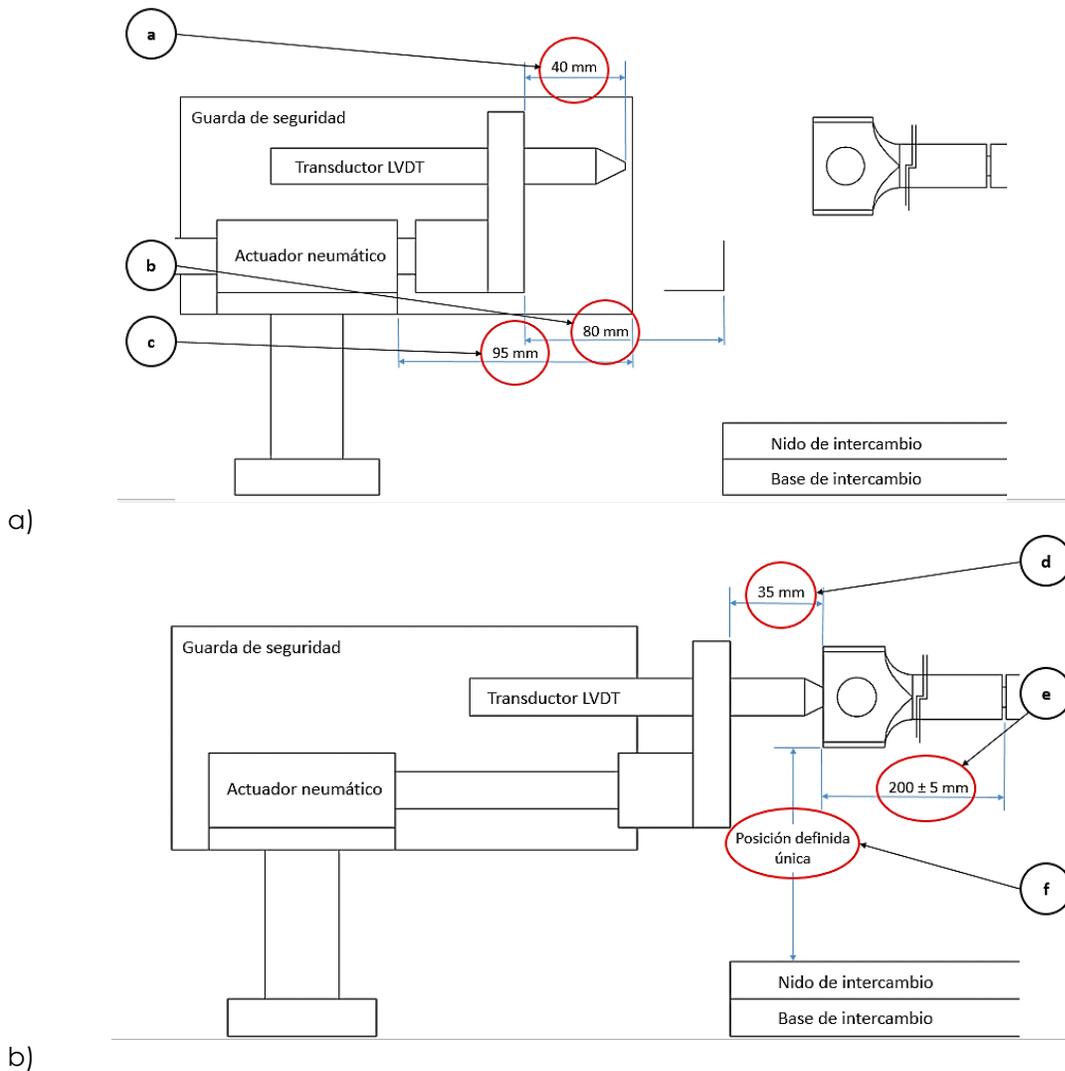


Figura 18. Diseño conceptual dimensiones LVDT:

a) posición inicial b) posición final

Elaboración propia

Como resultado se tienen las posiciones de distancia de ubicación LVDT al “cero pieza” y la altura de la “Base Intercambio” a “cero pieza”, estas dimensiones son las principales características a cumplir para la introducción de nuevos modelos y sus herramientas requeridos.

### 3.3.2. Consideraciones de atornillador

Otro de los principales procesos es la instalación de tuercas mediante el uso de un atornillador eléctrico para la fijación del componente una vez calibrado en el rango requerido, la selección del atornillador es basada en la combinación de rangos requeridos por cada uno de los modelos a trabajar tomando en cuenta los rangos mínimos y máximos requeridos. Para mantener la flexibilidad en la maquina se toma en cuenta que se añadirán nuevos productos, por lo tanto, se consideran aumentar un 30% la amplitud de los rangos, de esta manera podremos tener un rango más amplio para futuros modelos esto se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Rangos de torque

	Torque N/m	Torque con amplitud	Torque Final N/m	Rango
Mínimo	34	23.8	20	70%
Máximo	47	61.1	70	130%

Elaboración propia

También, se deberá tomar en cuenta la geometría de los modelos para acoplar una extensión al atornillador para trabajar con todos ellos. Otra de las características a cumplir por parte del atornillador, es la capacidad de indicar al momento que las tuercas son dañadas, así como la medición de ángulo y numero de vueltas realizadas en el proceso.

### 3.3.4. Equipos neumáticos

Para la selección de equipos neumáticos, es requerido conocer el gasto de aire de todos los actuadores, equipos (PACE 5000), conexiones y mangueras de distribución, el cálculo es de 0.17 m<sup>3</sup> con un rango del 30% extra, con esta información se seleccionan los equipos de suministro y distribución. También se

debe de conocer la presión de aire en el servicio, para así obtener una unidad de mantenimiento que cumpla con estas características bajo la normativa ISO 8573-1:2010.

### 3.3.3. Redes computacionales

Una de las principales características para el uso del banco flexible es poder procesar varios tipos de modelos, por lo que es necesario que los cambios físicos y de control se realicen de una manera óptima, basados en la información y configuraciones disponibles en los bancos de datos. El banco flexible cuenta con diferentes dispositivos que se comunican con el controlador, a continuación, en la Figura 19 se muestra el diagrama de interconexión de los diferentes equipos que conforman la red del banco flexible de pruebas.

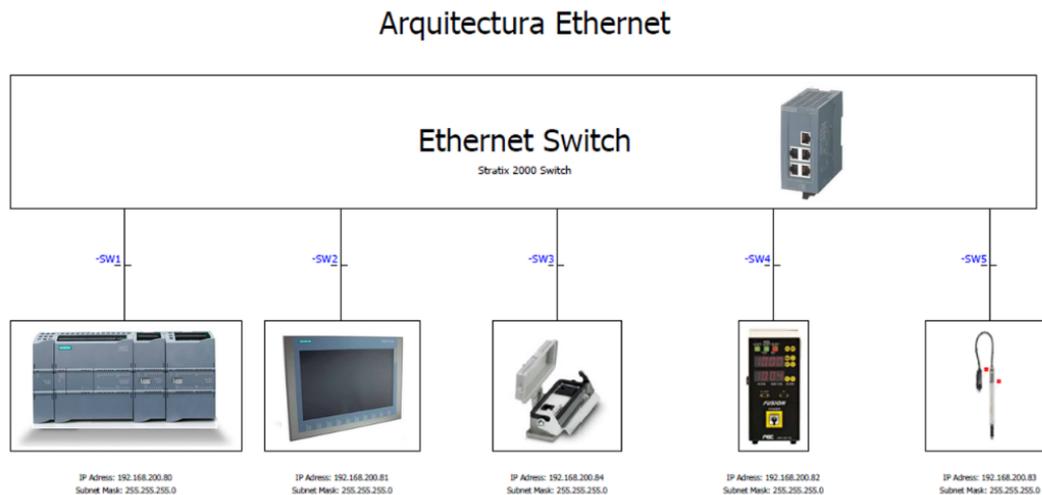


Figura 19. Diagrama interconexión equipos  
Elaboración propia

Para acceder a la información y configuración del sistema el banco cuenta con un panel de interfaz hombre máquina (HMI por las siglas en Ingles de Human Machine Interface), en el cual es posible elegir cada uno de los modelos a calibrar, así como los cambios de las variables de proceso de los mismos. De la misma manera se muestran los equipos y dispositivos que conforman el sistema de seguridad y proceso del banco. La HMI maneja un código de colores con base a

IEC 60204-1. El modelo seleccionado para el banco flexible es un PanelView Pantalla Táctil, 7 VGA, TFT Color el cual se muestra en la Figura 20.

El controlador empleado es un PLC, el cual posee módulos de entradas y salidas digitales y analógicas a 24 Volts, así como dos puertos de comunicación Ethernet/IP. El sistema cuenta también con un Ethernet Switch, No administrable de ocho puertos RJ45 eléctricos.

La configuración de red entre los elementos de comunicación es definida por un protocolo de comunicación. Uno de ellos es la interfaz ETHERNET IP la cual permite el intercambio de datos entre el PLC con el panel de control (HMI) y el atornillador HFC 3000 II. Además, brinda la disponibilidad de interconexión a la red mediante el Ethernet Switch, el cual proporciona un puerto dedicado para servicio. También se cuenta con una tarjeta RS232 para establecer comunicación con el PACE 5000.



Figura 20. Pantalla táctil HMI (SIEMENS 2011)

## 4. RESULTADOS

En esta etapa se muestra la cuarta fase correspondiente a la instalación y puesta a punto del banco flexible de calibración.

### 4.1. FASE 4: INSTALACIÓN Y PUESTA A PUNTO

Todos los diseños e implementación realizados en las etapas anteriores se apegan a los requisitos y presupuestos marcados por la empresa cliente. Sin embargo, todo el trabajo hasta ahora realizado debió ser autorizado por la misma, por parte de los departamentos involucrados y validado a partir de un documento en el cual consta de la autorización y firma de los líderes de diferentes departamentos: jefe de ESH (por las siglas en inglés de Environment, Health and Safety), jefe de manufactura, gerente de ingeniería, gerente de producción, jefe de calidad, ingeniero de PI (Industrialización y Proceso) y coordinador de mantenimiento.

En la Tabla 4 se muestran los datos y especificaciones finales generales del banco flexible de calibración, mientras que en la Figura 21 las vistas isométrica y general.

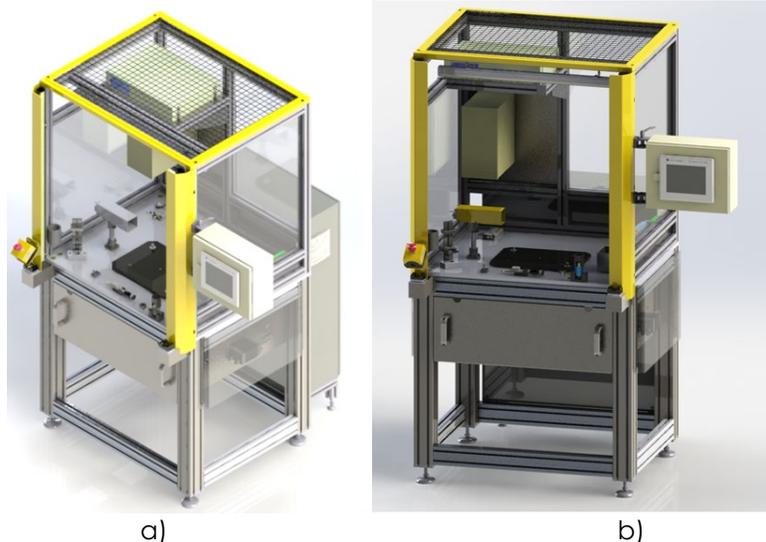


Figura 21. Diseño CAD final banco flexible de calibración:  
a) vista isométrica b) vista general  
Elaboración propia

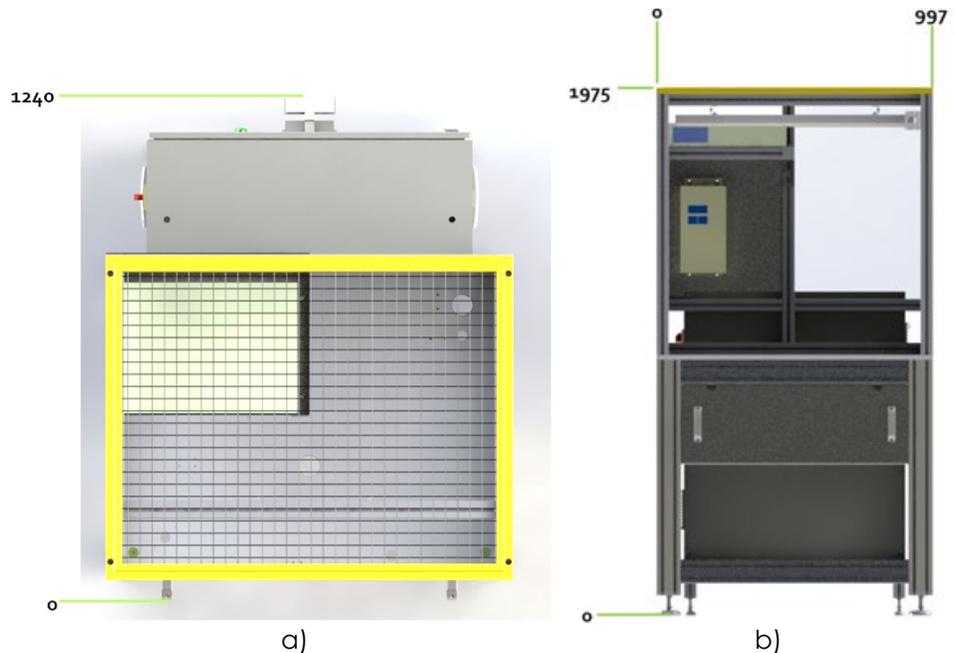
Tabla 4. Datos generales del banco flexible

<b>Límites de la máquina</b>	
Ambiente	Industrial
Nivel de formación requerido	Formación Regular
Operada por	Operarios de Planta
Uso previsto	Multi – operación
Vida útil de la máquina	10 años
Dimensiones de la máquina	997 mm largo x 1240 mm ancho x 1975 mm alto esto es sin contar con HMI ya que tiene la bondad de desplazarse.
<b>Información sobre uso y mantenimiento</b>	
Materia prima	Turbocargador
Tiempo de parada de emergencia	Inmediato
Ciclo operación	Calibración promedio en 45 segundos
Número de operadores (normal)	1
Número de puestos de mando	1
Mantenida por	Personal Formado Permanentemente
Frecuencia de mantenimiento	Mensual (Manual de mantenimiento)
Limpieza	Operarios
Reparación de atascos	Personal de Mantenimiento
<b>Fuentes de Energía</b>	
Mando (control), energía eléctrica	24V DC
Alimentación principal, energía eléctrica	110V AC - 60Hz, 440V AC
Energía neumática	6 Bar, 8 Bar en servicio
Energía hidráulica	N/A

Elaboración propia

#### 4.1.1. Estructura final

En la Figura 22, se muestran las dimensiones generales de la máquina sin tomar en cuenta la HMI, ya que este puede girarse dependiendo la necesidad de operación.



a)  
 b)  
 Figura 22. Diseño CAD estructura:  
 a) vista planta, b) vista frontal  
 Elaboración propia

#### 4.1.2. Protecciones y dispositivos de seguridad

Las condiciones de seguridad en el banco flexible cubren diferentes aspectos ya que debe de ser lo suficientemente robusta tanto para el cuidado del personal que lo opera como para los equipos que están dentro del mismo, ya que la calibración del diafragma en el turbocargador implica el movimiento del vástago al aplicar en el diafragma energía neumática. Dichas condiciones fueron evaluadas por una empresa externa dedicada al ramo de seguridad y se muestran en la Figura 23.

Como se observa se mantiene restringido el acceso lateral y posterior mediante paneles de policarbonato transparentes, mientras que el acceso superior se restringe mediante una reja cuadriculada de acero (30 mm de lado cuadrado).

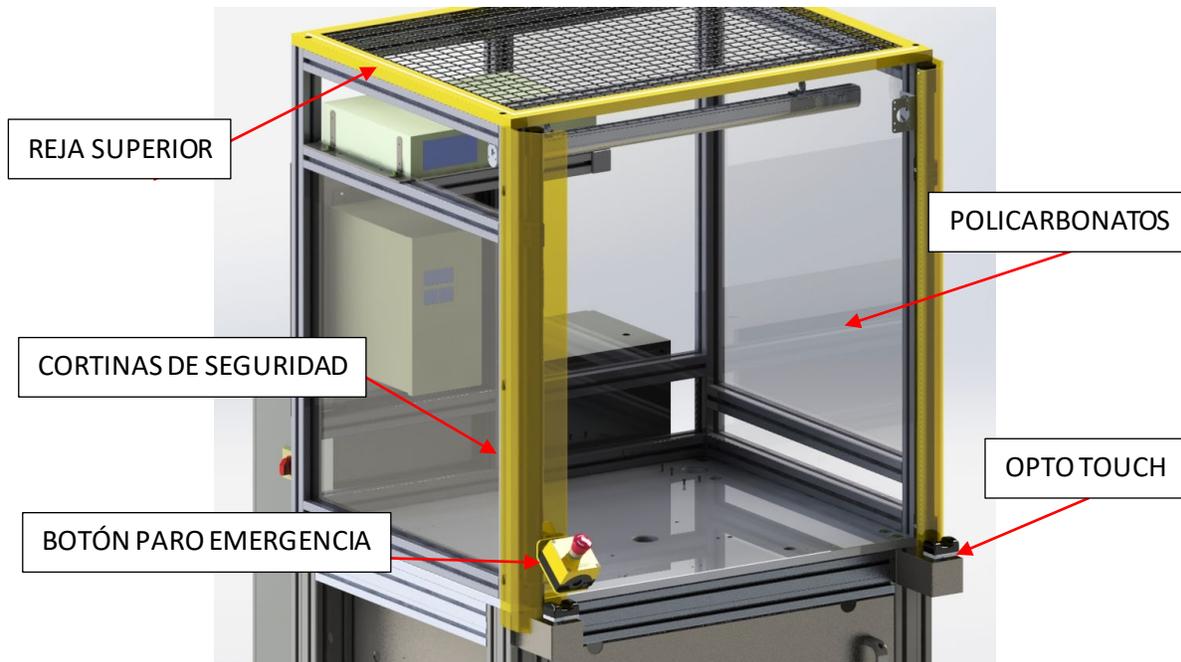


Figura 23. Diseño CAD dispositivos de seguridad banco flexible  
Elaboración propia

De esta manera se tiene acceso solamente por la parte frontal, el cual cuenta con la protección mediante cortinas ópticas. Se realizó el cálculo de la distancia adecuada, encontrando que la longitud de seguridad mínima es de 234 mm, según muestra la Tabla 5. Tomado esto en consideración se colocaron en una distancia de 320 mm como lo muestra la Figura 24.

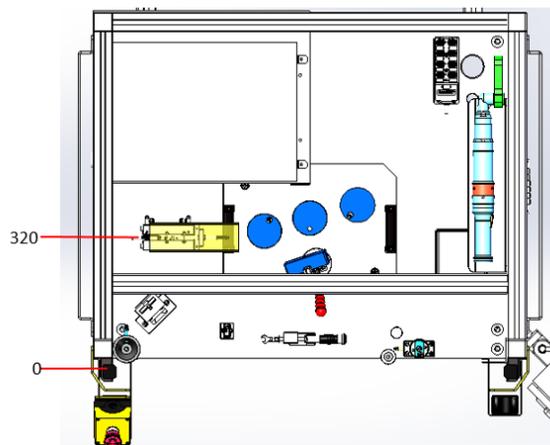


Figura 24. Diseño CAD distancia de seguridad  
Elaboración propia

Tabla 5. Distancia mínima cortinas ópticas

Distancia mínima desde punto de peligro a barrera de luz (mm)	S	=	(K	*	T)	+	C
	234	=	2000	*	0.117	+	0

Elaboración propia

De igual manera se cuenta con botones de paro de emergencia en la parte frontal de la máquina en donde el operador tiene interacción con el proceso, así como en el panel HMI. La función de estos interruptores es realizar un paro categoría 0 de acuerdo con el estándar IEC 60204-1 en donde se detienen todos los movimientos eléctricos, neumáticos e hidráulicos junto con la alimentación de dichas energías. El botón de paro de emergencia es color rojo con fondo amarillo de acuerdo con ISO 13850.

#### 4.1.3. Gabinete eléctrico

El control y manejo de energía eléctrica está situado en un gabinete eléctrico, el cual cumple con los requerimientos de las normativas y específicos de la empresa cliente. El diseño final del gabinete se muestra en la Figura 25. Cuenta con un interruptor desconectador de varilla, indicador led y puerto de servicios, con el fin de realizar labores de manera segura ya que no es necesario abrir el gabinete para realizar algún tipo de conexión.

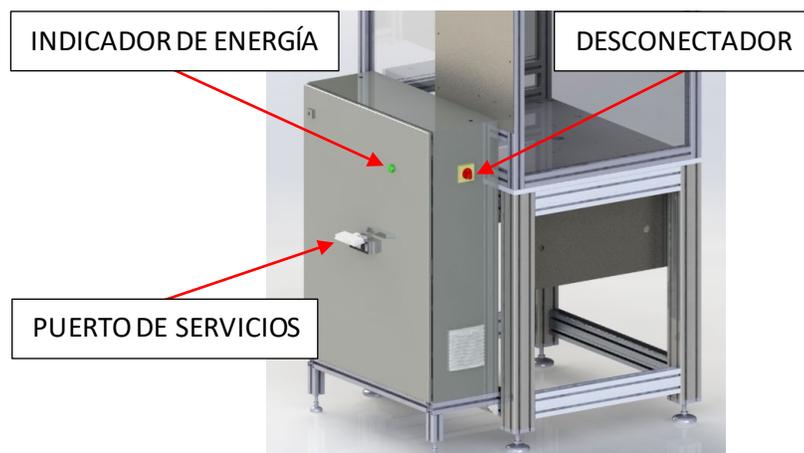


Figura 25. Diseño CAD final gabinete eléctrico banco flexible  
Elaboración propia

Dentro del gabinete eléctrico está alojado el PLC siemens CPU XXX-X XX, con sus respectivas expansiones de entradas y salidas digitales, además de los dispositivos descentralizados que manejan las electroválvulas.

Igualmente se cuenta con un relevador de seguridad Sick, que se muestra en la Figura 26, encargado de monitorear las funciones de seguridad ya mencionadas como son el paro de emergencia y cortinas ópticas.



Figura 26. Relevador de seguridad SICK  
Elaboración propia

Los materiales utilizados dentro del gabinete en las conexiones eléctricas poseen un grado de protección de al menos IP2X. Toda parte energizada está aislada con la finalidad de evitar un contacto directo con otras partes energizadas como lo marcan las normativas IEC 60204-1 / ISO 12100. El interior del tablero eléctrico se muestra en la Figura 27.



Figura 27. Gabinete eléctrico banco flexible  
Elaboración propia

#### 4.1.4. Sistema neumático y electro-neumático

La prueba principal del banco flexible de calibración es la verificación del movimiento del vástago en el diafragma el cual se genera mediante energía neumática, utilizando una presión de 6 bar en la línea de servicio. El proceso de prueba tiene riesgos latentes los cuales se deben minimizar y/o eliminar.

El sistema neumático está formado por tres bloques principales. El primero es la unidad de mantenimiento cuyo diagrama se muestra en la Figura 28 la cual cuenta con: válvula de corte manual (200) con la cual puede realizarse el procedimiento LOTO, unidad de filtro regulador (201), unidad de lubricación (202), unidad de corte eléctrico controlada directamente con el relevador de seguridad (203), unidad de arranque progresivo para evitar el movimiento brusco de los equipos (204), módulo de derivación con línea a sensor de presión (205) y sensor de presión para retroalimentación al sistema de seguridad (9.0).

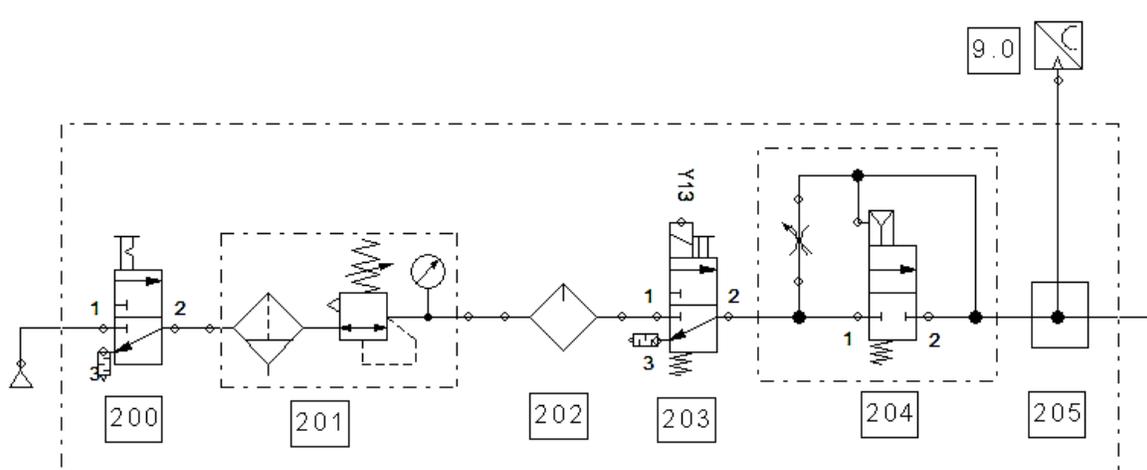


Figura 28. Diagrama neumático unidad de mantenimiento  
Elaboración propia

El segundo bloque es el sistema de flujo para llenado del diafragma del turbocargador, el cual se muestra en la Figura 29 con el siguiente arreglo: actuador neumático en el cual se instala el LVDT (1.0), conector neumático para introducir presión positiva y negativa (2.0), representación de PACE 5000 se anexa recomendación de conexiones en Anexo B (2.5), válvula de presión para asegurar

presión en línea (2.4), válvula 5/3 con centro cerrado para control de flujo de aire (2.6) y filtro de aire para quitar impurezas (2.7).

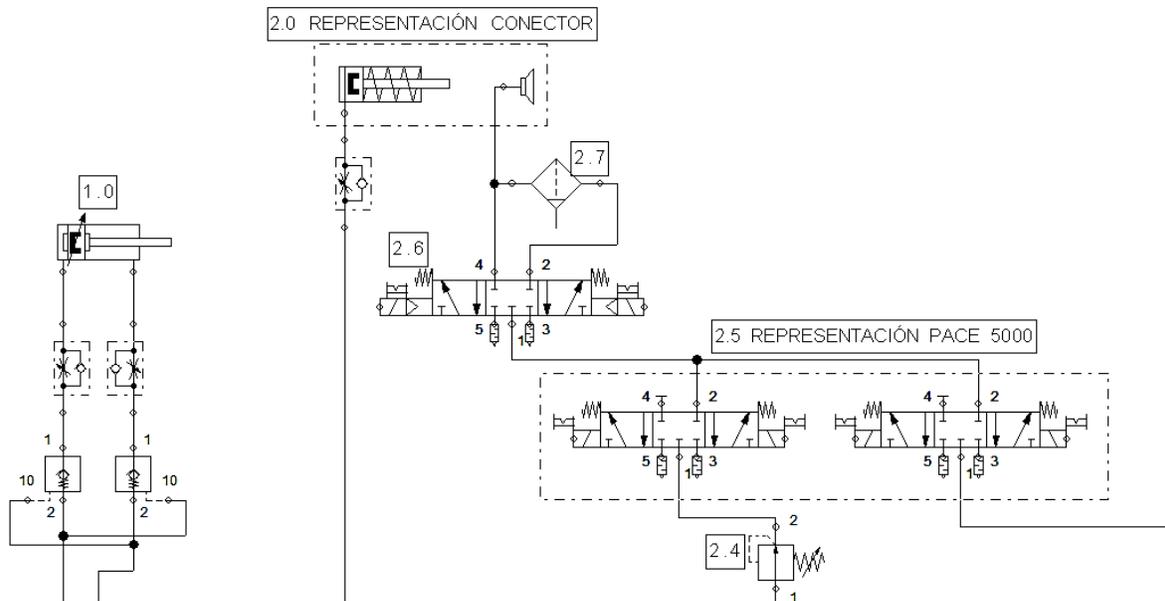


Figura 29. Diagrama neumático distribución de flujo  
Elaboración propia

El tercer bloque corresponde al control de aire en el proceso. En la Figura 30 se muestra el bloque de distribución de seis espacios, así como los cuatro módulos de válvulas que lo integran: válvula biestable 5/2 para actuador (J), módulo de dos válvulas monoestables 3/2 cerradas para conector de aire (C), módulo de dos válvulas monoestables 2/2 cerrada y abierta para entrada de presión positiva PACE 5000 (I), válvula tobera de aspiración entrada presión negativa PACE 5000 (A) y dos espacios con vías bloqueadas para futuras automatizaciones.

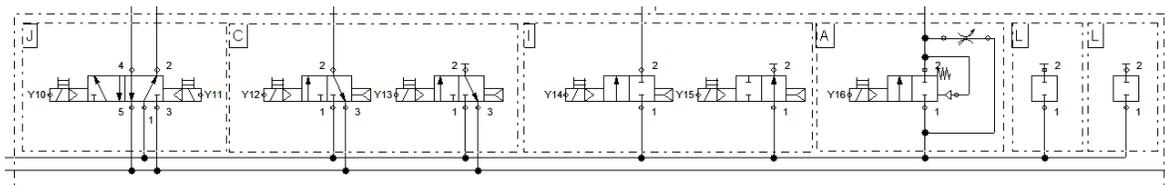


Figura 30. Diagrama neumático control de aire  
Elaboración propia

El diagrama neumático general final del banco flexible de calibración se muestra en la Figura 31.

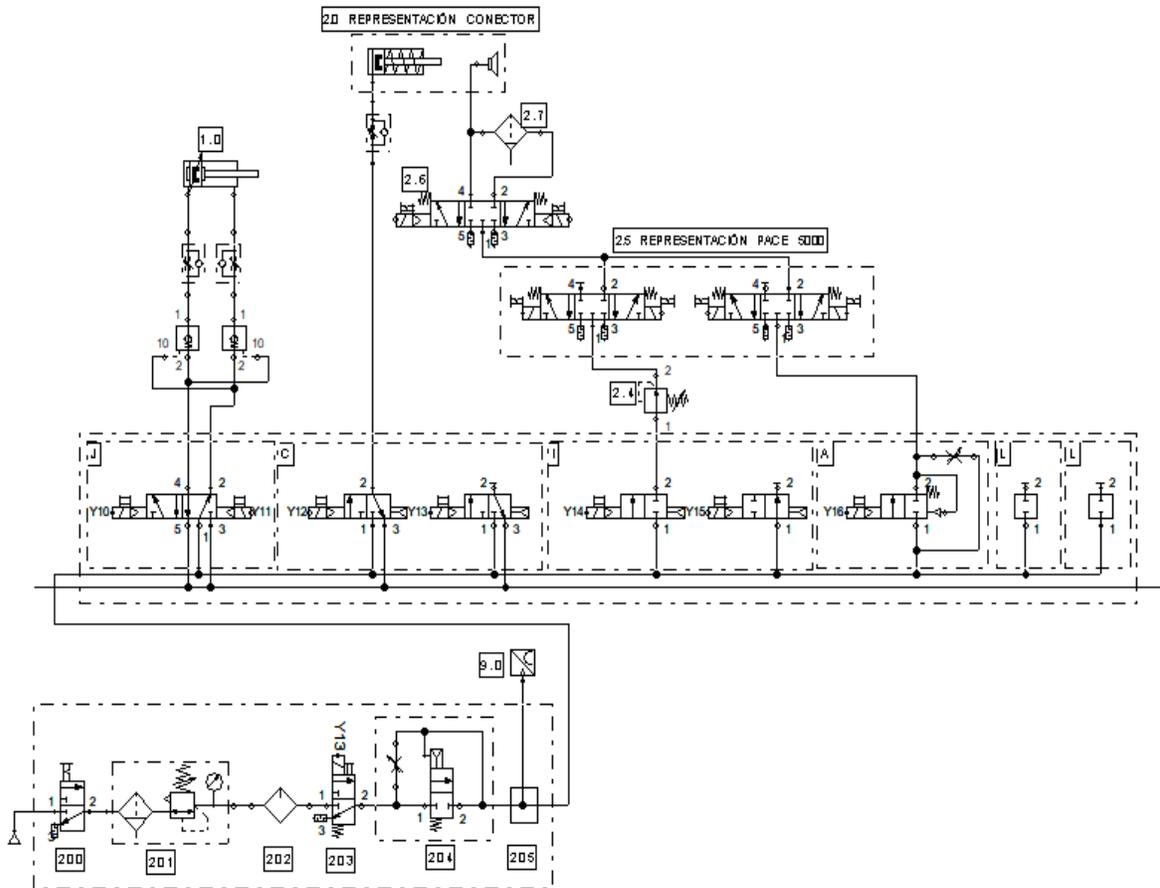


Figura 31. Diagrama neumático general final  
Elaboración propia

De igual manera el sistema neumático cuenta con la seguridad necesaria en dispositivos y conectores. La unidad de mantenimiento y distribución para servicio neumático se muestra en la Figura 32 en la cual puede observarse que dicha unidad está colocada en la cara lateral del banco flexible para facilitar el mantenimiento.



Figura 32. Diseño CAD final posición de unidad mantenimiento  
Elaboración propia

El procedimiento LOTO en la válvula de corte manual se muestra en la Figura 33, identificada como (200) en la Figura 33, dicho procedimiento deberá realizarse por personal calificado en el mantenimiento preventivo, predictivo o correctivo.



Figura 33. Sistema LOTO  
Elaboración propia

#### **4.1.5. Sistema para visualización y control de los parámetros de pruebas**

El sistema de control puede ser operado de forma automática o manual dependiendo del tipo de actividad que se requiera, y por fines de seguridad para equipos y personal en la mayoría de las ocasiones será de forma híbrida. La selección de este proceso se realiza por medio de la HMI, la cual permite la selección tanto del modelo a calibrar como la receta a utilizar mediante de su panel táctil. Igualmente muestra los parámetros del proceso de calibración, así como también las señales provenientes de sensores y equipos periféricos que

permiten una retroalimentación de las condiciones de las áreas de trabajo. La distribución de estos se muestra en la Figura 34.

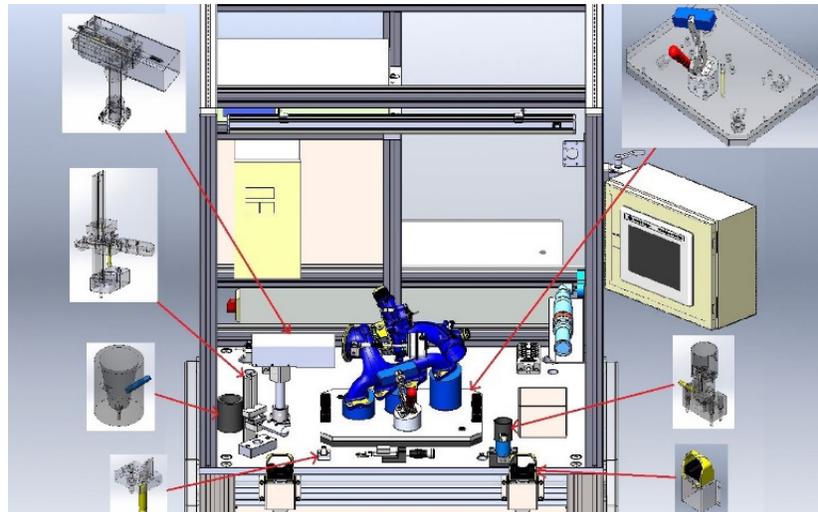


Figura 34. Distribución de sensores y equipos banco flexible  
Elaboración propia

La información se agrupa y maneja gráficamente por medio de las pantallas de la HMI, la cual tiene una pantalla inicial donde se muestra el menú principal por medio este se puede tener acceso a todas las pantallas de proceso como se muestra en la Figura 35.



Figura 35. HMI pantalla principal  
Elaboración propia

En la Figura 36 se muestra la pantalla “Operación y Modelo” la cual se utiliza para seleccionar el modo de operación en el que se trabajará el banco flexible de calibración.



Figura 36. HMI pantalla "Operación y Modelo"  
Elaboración propia

Para abordar los puntos de flexibilidad y dar el seguimiento correcto de las piezas fabricadas se cuenta con la pantalla de “Monitoreo de proceso”, que contiene el conteo de piezas probadas, para evaluarla la cantidad procesada real contra la planificada. De la misma manera se da la trazabilidad, quedando la posibilidad de una mayor flexibilidad dentro de la máquina en un futuro. Las principales variables y resultados de esta pantalla se muestran en la Figura 37.



Figura 37. HMI pantalla “Monitoreo de proceso”  
Elaboración propia

La pantalla “Monitoreo de Torque” se muestra en la Figura 38, en la cual puede observarse que contiene la información necesaria sobre los parámetros de torque elegidos en base del modelo a calibrar.



Figura 38. HMI pantalla “Monitoreo de Torque”  
Elaboración propia

En la parte inferior de todas las pantallas se muestran botones virtuales que permiten al usuario trasladarse rápidamente entre ellas requeridas durante el proceso de calibración, evitando movimientos repetitivos innecesarios entre pantallas y así obtener un rápido acceso a cada una de ellas. Estos botones, mostrados en la Figura 39, se refieren a las selecciones de: Inicio, Modo, Modo Manual, Monitoreo del Proceso, Vista Celda.



Figura 39. HMI botones virtuales principales  
Elaboración propia

Para la colocación del módulo de la HMI en la estación, como puede observarse en la Figura 40, se considera el rango de alturas para hombres (1600 mm) y mujeres (1400 mm) en la región en la cual se encuentra la empresa cliente. Por lo tanto, el centro del panel de la HMI está colocado a una altura de 1500 mm del nivel del suelo dicha altura indica.



Figura 40. Diseño CAD vista general montaje HMI banco flexible  
Elaboración propia

## **4.2. DISPOSICIÓN FINAL DE DISPOSITIVOS Y EQUIPOS EN EL ÁREA DE OPERACIÓN**

Una vez dada la descripción de las partes generales que forman al banco flexible se realizara la descripción de la disposición final del área de operación. Algunas de las operaciones llevadas a cabo en la primera etapa de automatización requieren de la intervención manual dependiendo de la receta a utilizar.

Estos procesos al ser semi – automáticos deben de estar dentro de un área en la cual el operador pueda tener a su alcance todas las herramientas involucradas, por lo cual es necesario considerar temas de 5´ s, ergonomía y JIT. El uso de estas metodologías garantizará evitar movimientos innecesarios, tener orden y limpieza para el rastreo y recolección de herramientas cuyo tiempo será adecuado e inclusive podrá generar memoria física. En la Figura 41 se muestran las herramientas que trabajan en conjunto para desarrollar el proceso requerido para el ensamble y calibración del producto.

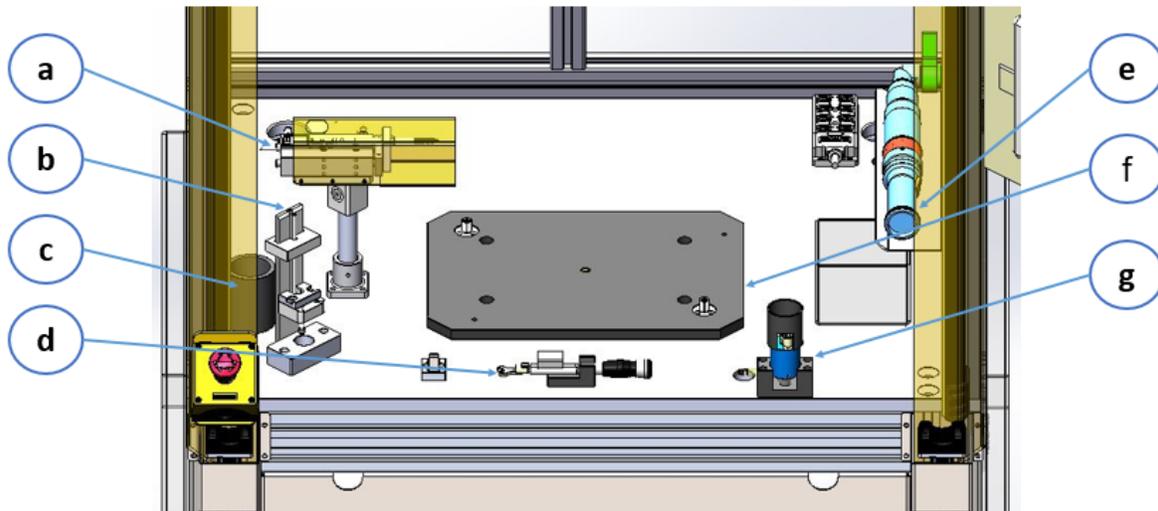


Figura 41. Diseño CAD final distribución herramientas operación  
Elaboración propia

En esta figura a) sistema y montaje para LVDT, b) dispensador de anillos de retención “truack”, c) base del aplicador de resina, d) llave de torque, e) atornillador eléctrico, f) base de intercambio, y g) conector de neumático.

El banco cumple con las designaciones ergonómicas requeridas por la empresa cliente, ya que los equipos de trabajo están dentro del área especificada como ergonómica, especificada en color verde, tal como se muestra en las Figuras 42, 43 y 44. La Figura 42 muestra la amplitud de alcance del operador, la Figura 43 muestra la altura ergonómica del área de trabajo, mientras que la Figura 44 muestra el alcance frontal ergonómico del área de trabajo. De esta manera se mantiene una posición neutra ergonómica en el proceso, minimizando la fatiga de operadores, movimientos cadera laterales y movimientos laterales rígidos

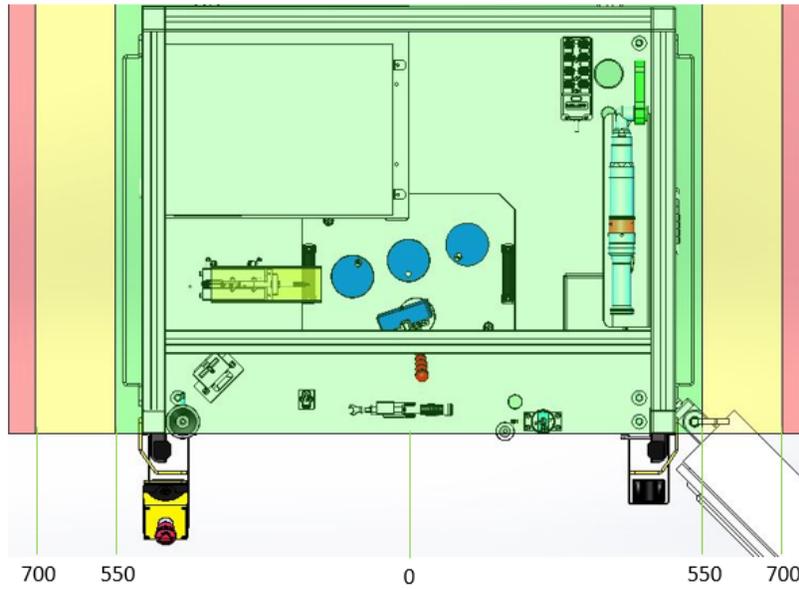


Figura 42. Diseño CAD rango amplitud área de trabajo  
Elaboración propia

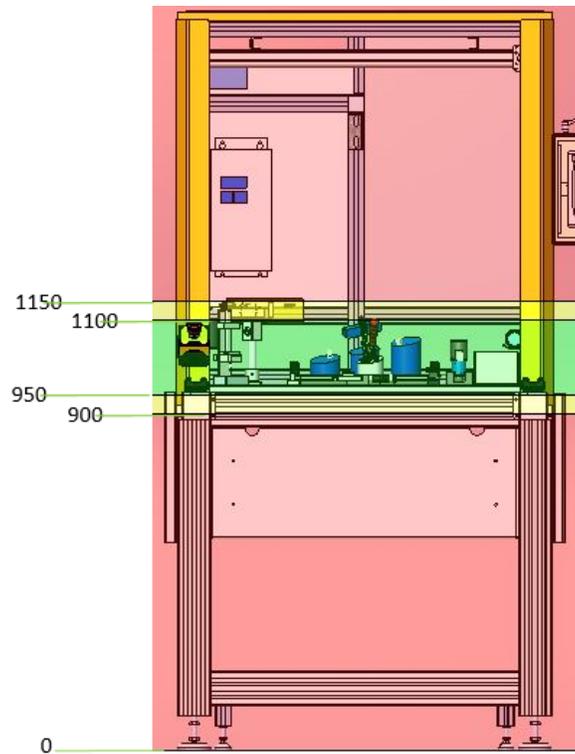


Figura 43. Diseño CAD rango altura área de trabajo  
Elaboración propia

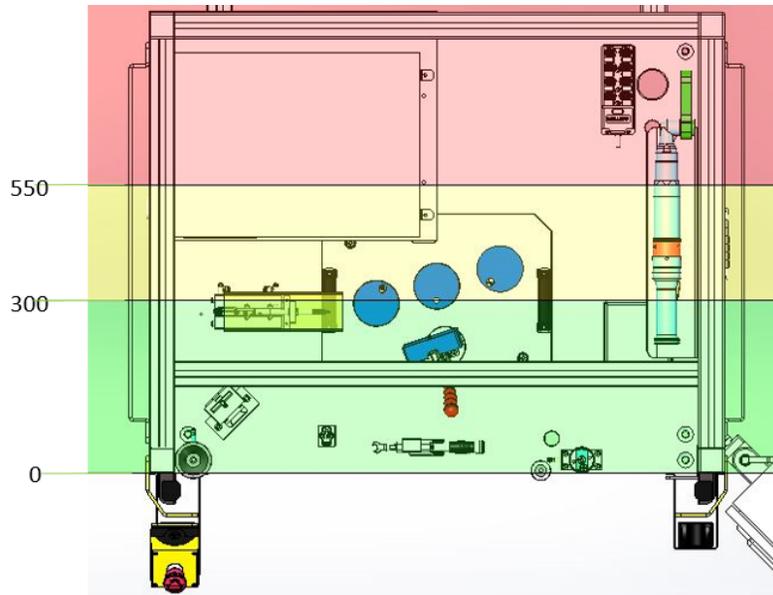


Figura 44. Diseño CAD rango profundidad área de trabajo  
Elaboración propia

La base de intercambio es fundamental para los cambios rápidos de configuración física dada por los herramientas a utilizar, como puede observarse en la Figura 45 contiene posicionadores y pernos guía que permiten realizar los cambios de modelos rápido en la etapa inicial de automatización. Este procedimiento puede ser realizado por operadores del banco flexible de calibración ya que no es necesario el uso de herramientas especializadas, es mediante el movimiento de dos tornillos “aflojar / apretar” en los posicionadores. Los pernos guía están colocados de manera asimétrica para tener un solo sentido de ensamble realizando la función de un poka-yoke. En la Figuras 46, 47, 48 y 49 se muestran las consideraciones dimensionales para la elaboración de la misma, enfocado en la normativa ASMEY14.5.



Figura 45. Diseño CAD final base intercambio banco flexible  
Elaboración propia

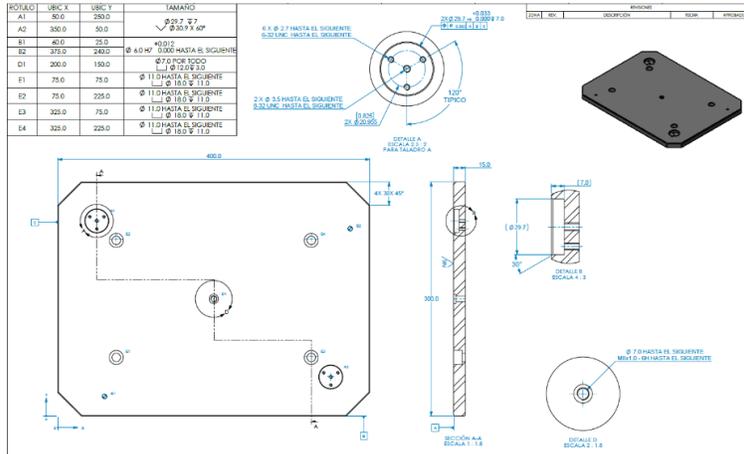


Figura 46. Diseño 2D final base intercambio  
Elaboración propia

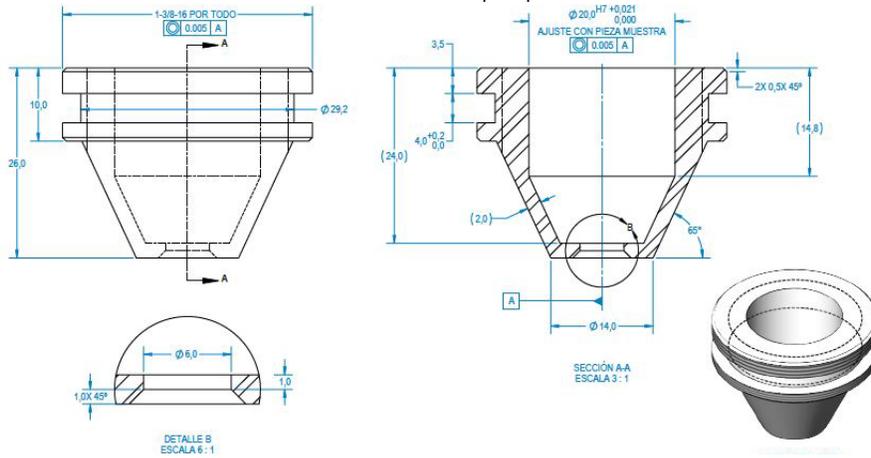


Figura 47. Diseño 2D final punta conector  
Elaboración propia

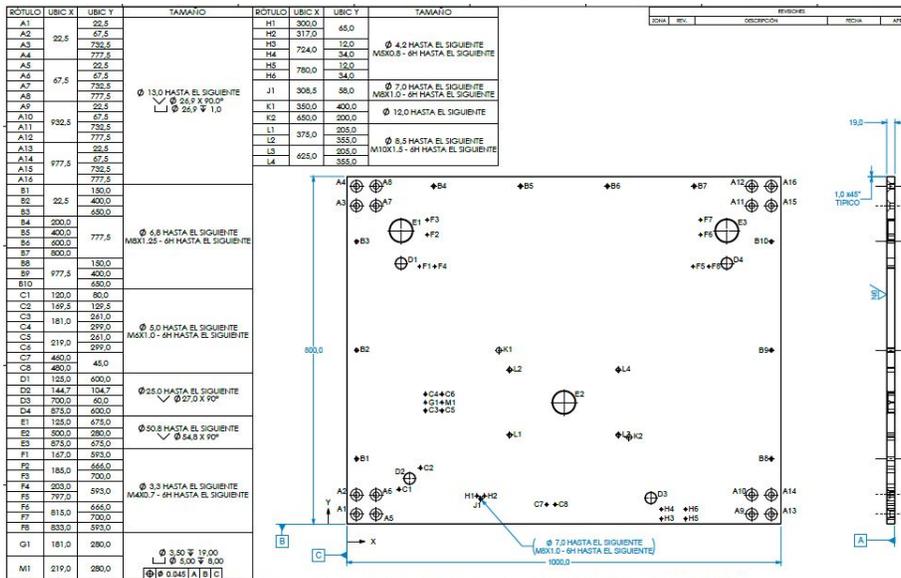


Figura 48. Diseño 2D final placa principal  
Elaboración propia

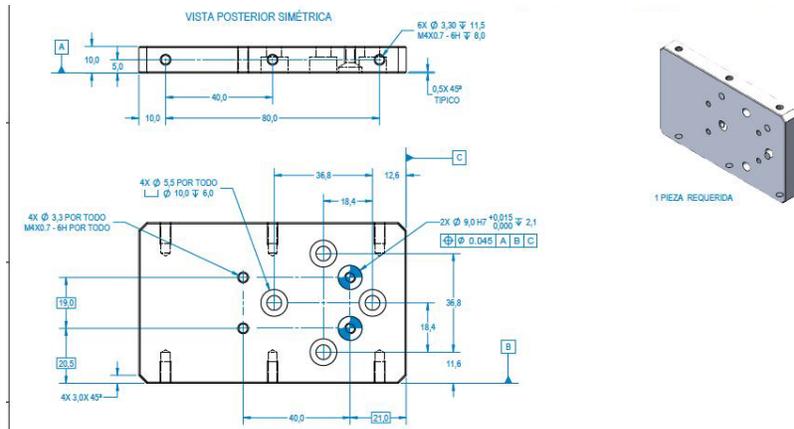


Figura 49. Diseño 2D final base LVDT  
Elaboración propia

Los herramientas o “nidos” desarrollados para cambios de configuración rápida de los modelos de turbocargadores a calibrar se muestran en las Figuras 50, 51 y 52. Gracias al análisis para la creación de familias de partes se tuvo como resultado derivado que el modelo “nido 3” puede ser utilizado en dos modelos diferentes de turbocargadores.

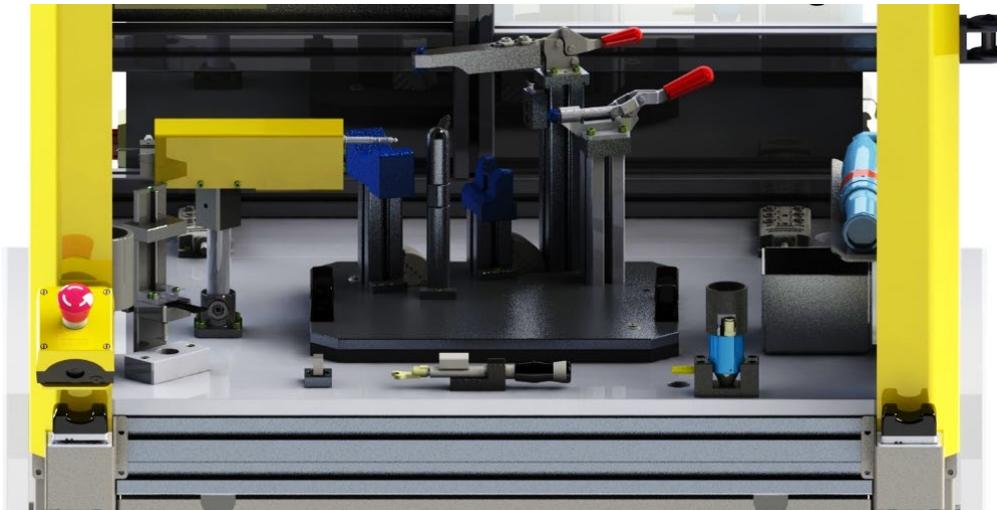


Figura 50. Diseño CAD final nido 1  
Elaboración propia

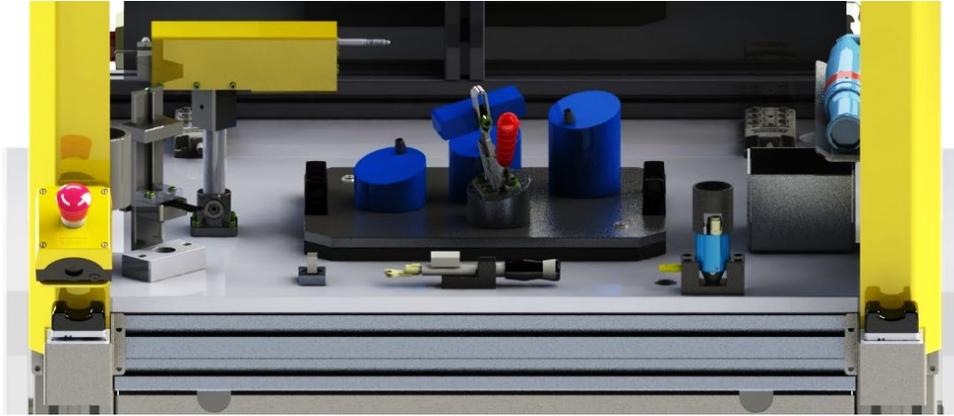


Figura 51. Diseño CAD final nido 2  
Elaboración propia

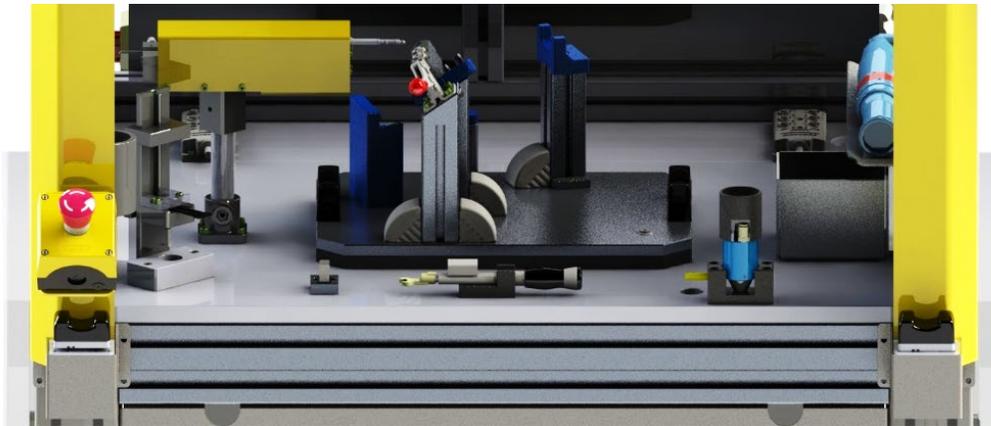


Figura 52. Diseño CAD final nido 3  
Elaboración propia

Otra consideración relevante en el diseño de los nidos, dentro de los requerimientos de ergonomía del cliente, es el peso de cada uno de ellos. Como lo podemos observar en las Figuras 53, 54 y 55 se indica cada uno de los pesos de los nidos en kilogramos (kg).

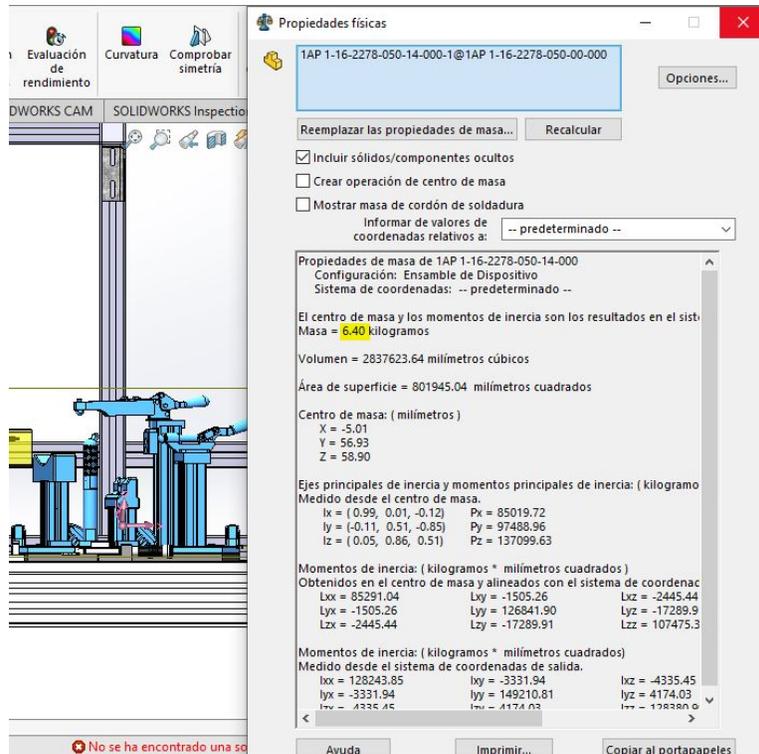


Figura 53. Diseño CAD final nido 1 propiedades de masa  
 Elaboración propia

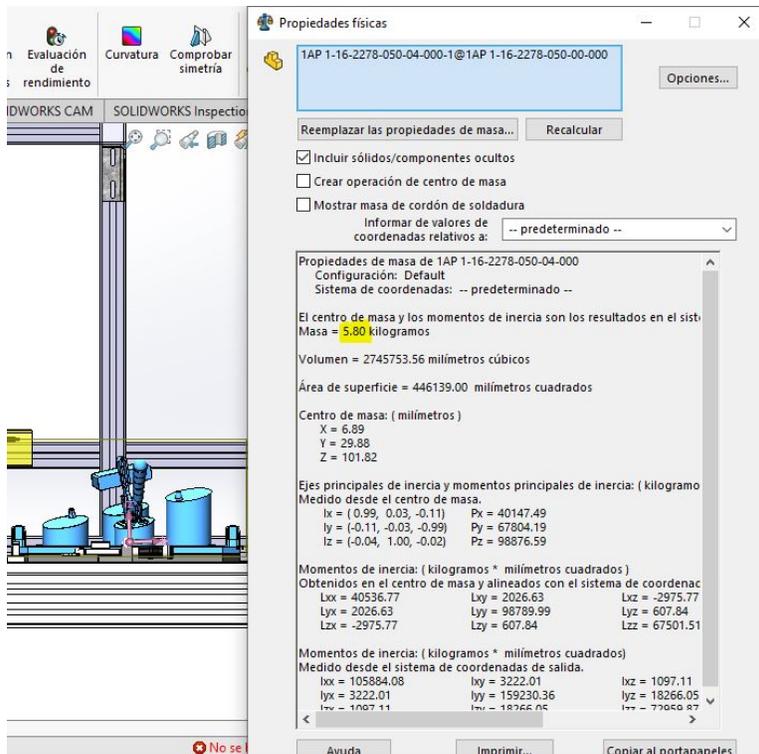


Figura 54. Diseño CAD final nido 2 propiedades de masa  
 Elaboración propia

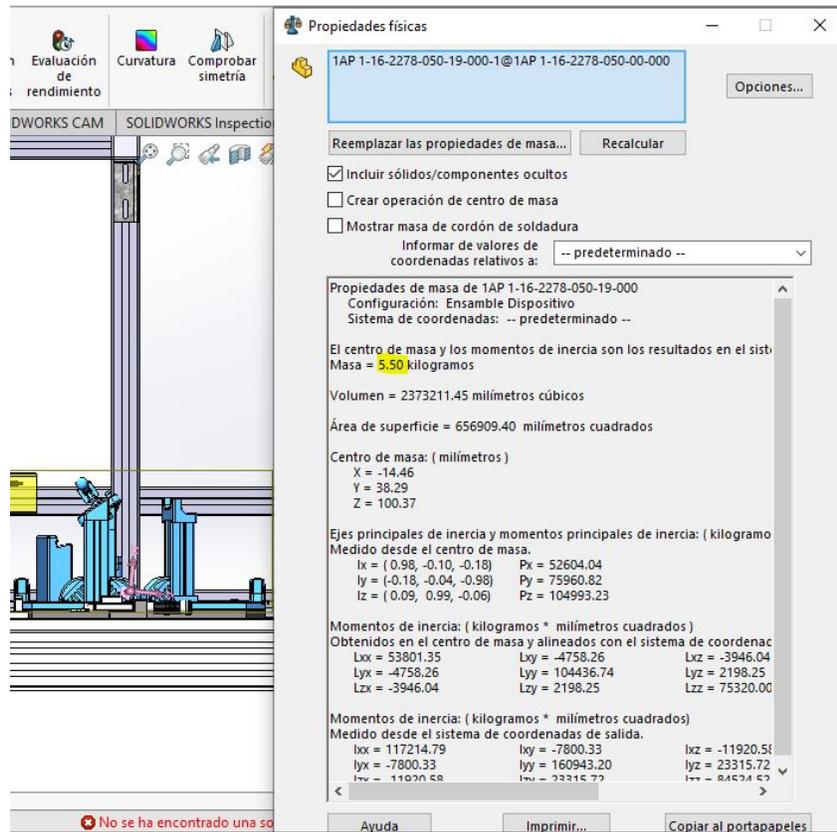


Figura 55. Diseño CAD final nido 3 propiedades de masa  
Elaboración propia

Dentro de los equipos utilizados en el proceso de calibración están el atornillador eléctrico y el conector de neumático. Como se muestra en la Figura 56, el atornillador eléctrico también cuenta una extensión para mejorar la manipulación del atornillador ya que el diseño de los herramientales es resultado del “cero pieza” por lo que se generan diferentes posiciones y orientaciones del producto.



Figura 56. Diseño CAD atornillador con extensión  
Elaboración propia

Mediante el conector neumático se introduce aire a presión positiva o negativa al diafragma del turbocargador proveniente de un controlador retroalimentado de presión. El uso de este conector se muestra en las Figuras 57 y 58.

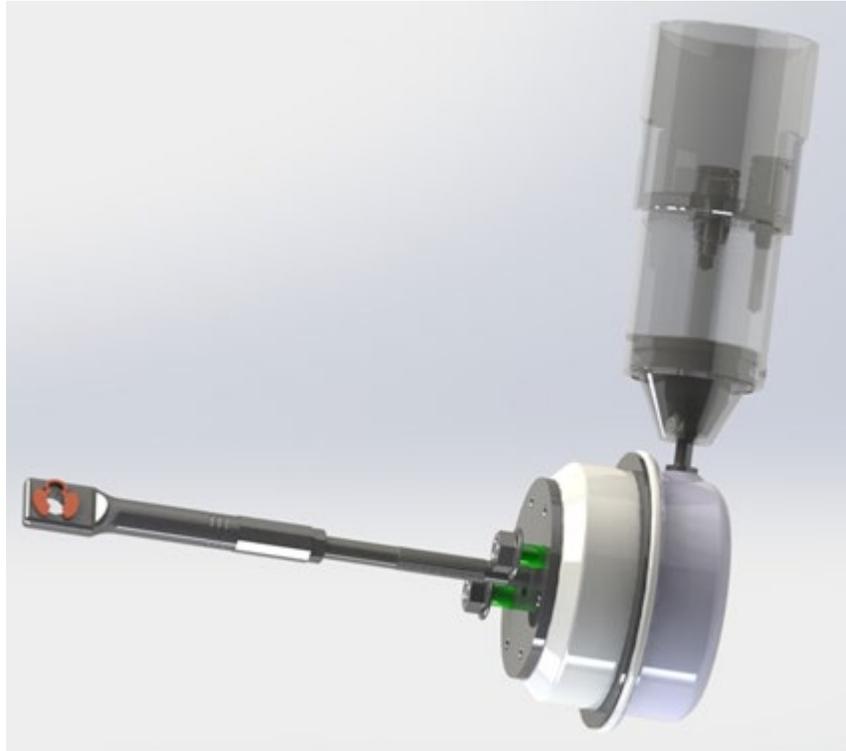


Figura 57. Diseño CAD uso conector neumático vertical  
Elaboración propia

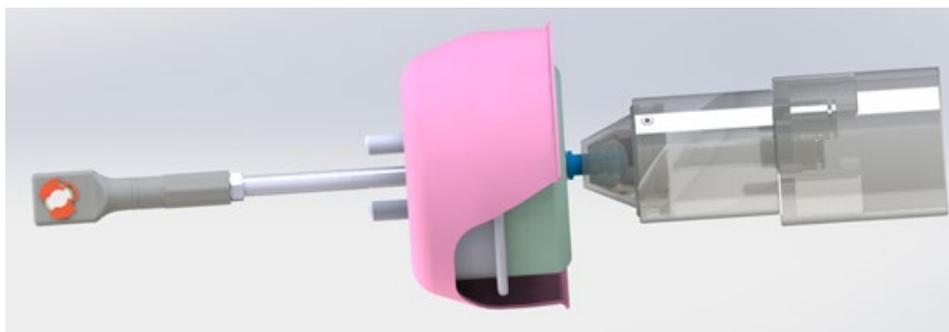


Figura 58. Diseño CAD uso conector neumático horizontal  
Elaboración propia

Los instrumentales permiten que la posición del dispositivo LVDT sea fija con respecto a la disposición del diafragma en los modelos de turbocargadores, ya que este durante la prueba estará ya ensamblado con el resto del turbocargador,

teniendo como resultado el montaje en el actuador neumático. Los tres instrumentales generados para la prueba de cuatro modelos de turbocargadores se muestran en las Figuras 59, 60 y 61, los cuales como puede observarse contribuyen en gran manera a la flexibilidad del banco de calibración.

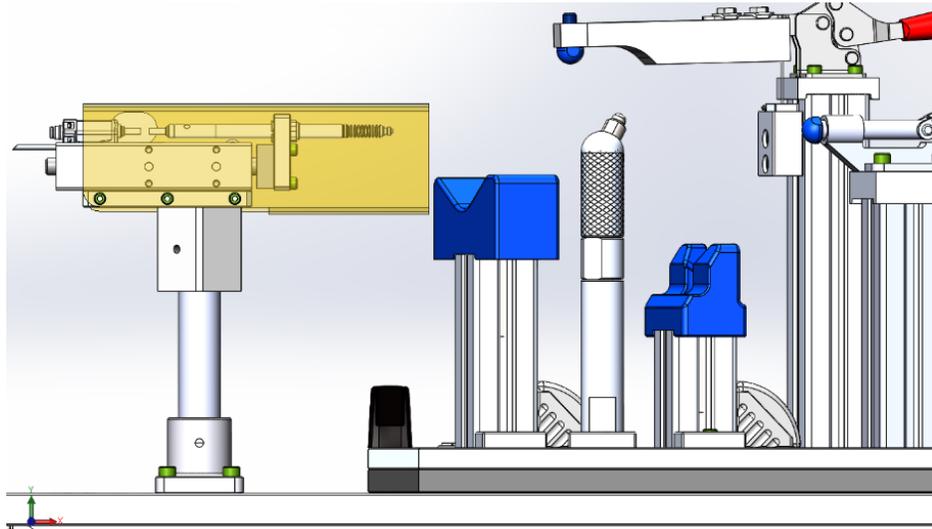


Figura 59. Diseño CAD final posición LVDT nido 1  
Elaboración propia

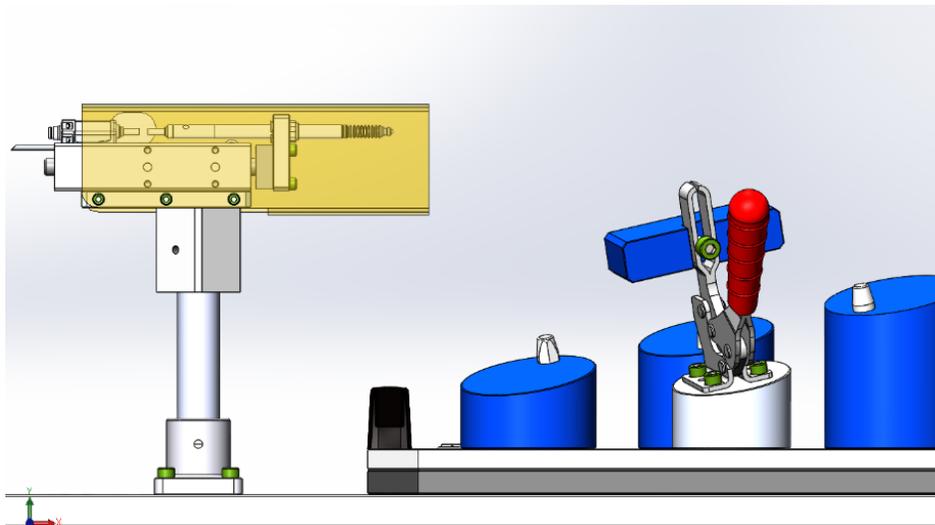


Figura 60. Diseño CAD final posición LVDT nido 2  
Elaboración propia

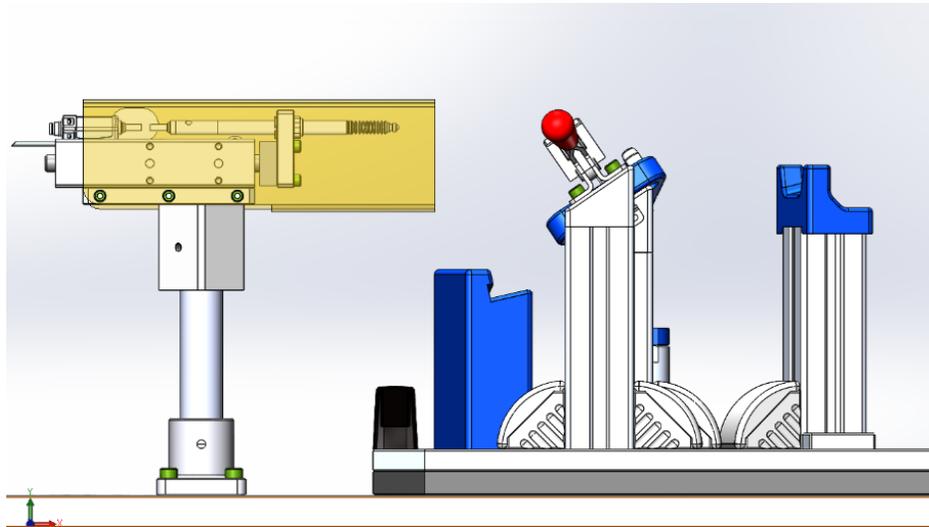
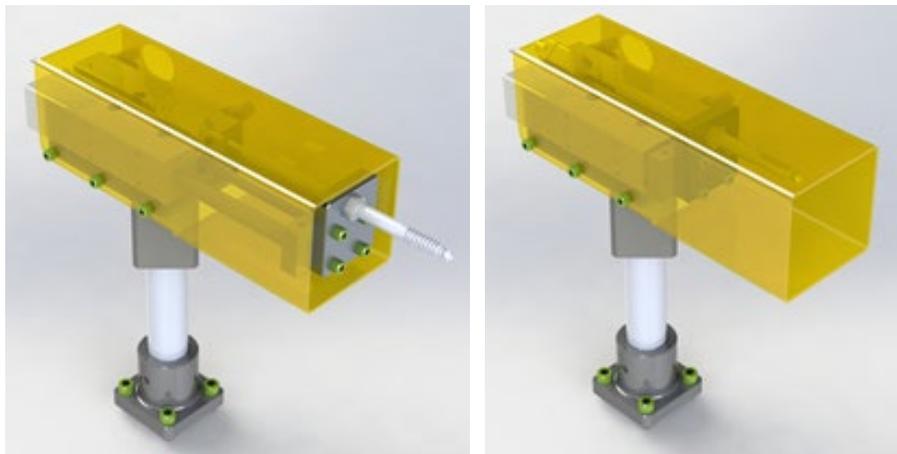


Figura 61. Diseño CAD final posición LVDT nido 3  
Elaboración propia

En la Figura 62 se muestra a detalle el ensamble del Pedestal, LVDT, actuador neumático y guarda, en las posiciones "Retraído / Extendido".



a) b)  
Figura 62. Diseño CAD Montaje LVDT  
a) posición extendida, b) posición retraída  
Elaboración propia

Debido a que el proceso requiere el aseguramiento del producto una vez calibrado se incorpora en el banco flexible un dispensador de anillos de retención "truack", una llave de torque y el aplicador de resina. El dispensado de anillos se

realiza mediante un mecanismo diseñado de manera personalizada como se muestra en la Figura 63.



Figura 63. Diseño CAD final dispensador de anillos track  
Elaboración propia

La llave de Torque, mostrada en la Figura 64 incorpora un sensor que asegura el apriete de la tuerca para bloquear el movimiento de "Ajuste Ensemble". Tiene como característica que al alcanzar el torque predeterminado aplicado sobre el ensamble del producto, la llave se desacopla internamente para no sobrepasar el valor establecido.

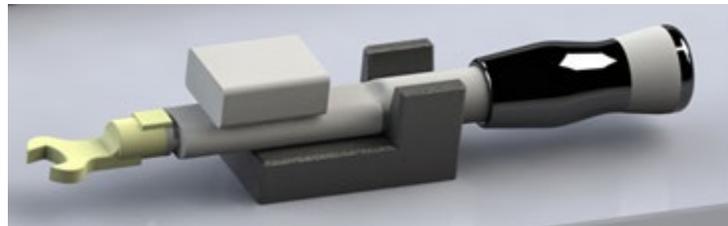


Figura 64. Diseño CAD llave de torque  
Elaboración propia

Finalmente la base del aplicador de resina, mostrado en la Figura 65, tiene como objetivo indicar al momento de la aplicación de esta si el proceso de calibración se ha concluido. Por medio del sensor de retro- alimentación se indica a la receta que para el turbocargador calibrado en turno se ha concluido exitosamente el proceso.

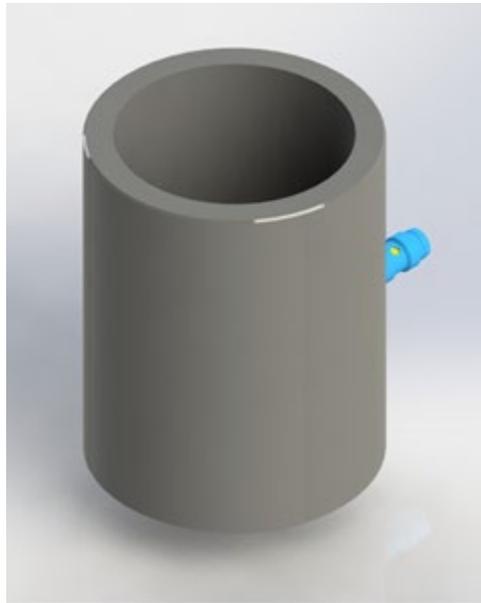


Figura 65. Diseño CAD base del aplicador de resina  
Elaboración propia

Todos los equipos utilizados dentro de la calibración de turbocargadores deben apegarse a los requerimientos de cargas ergonómicas designadas por la empresa cliente. Como se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6. Pesos de equipos

<b>Uso</b>	<b>Equipo</b>	<b>Peso en kg</b>
Rutina	Atornillador	2.50
	Resina	0.15
	Llave de torque	0.35
No Rutina	Nido 1	6.40
	Nido 2	5.80
	Nido 3	5.50

Elaboración propia

En las Figuras 66 y 67 se muestra las pruebas iniciales con la fabricación parcial del banco flexible de calibración.



Figura 66. Pruebas parciales iniciales fabricación  
Elaboración propia



Figura 67. Pruebas iniciales con dispositivos y equipos  
Elaboración propia

Para la validación de los puntos logrados tienen relación directa con la información de índole de "propiedad intelectual" así como con los contratos de

“Confidencialidad y No Competencia” suscritos tanto entre la Empresa Cliente-Integra Automation así como entre Integra Automation-José Moreno. Por tal motivo no es viable mostrar en su totalidad la ingeniería, estudios y evaluaciones realizadas al banco flexible de calibración en sus etapas de diseño fabricación y puesta a punto. En la Figura 68 se muestra el reporte de aceptación de proyecto identificado “General Delivery Specification Book: Actuator Calibration and Assembly Benches – Form 5604, Rev A” por parte de la empresa cliente, el cual en su formato físico incluye las firmas de aceptación de los encargados y jefes de los diferentes departamentos encargados de la validación y verificación del mismo.

Constraints			
C1	Safety	CE Marking w/ risk assessment (subject to audit)	Yes
C2	Automated	Percent of operator time required to meet cycle time	≤50%
C3	Durable	Design Life	>10 yrs
C4	Small Size	a. Footprint requirement (including operator space) b. Height	< TBD m <sup>2</sup> < TBD m
C5	Flexible	Modular design	Yes
C6	Only Standard Utilities Required	Electricity: 400V, 50Hz, 3-Phase without neutral (Europe). 480V, 60Hz, 3-Phase (Americas) Air: De-oiled compressed air 600 kPa-g	Complies
C7	Operates in factory environment	Temperature: 10°C to 45°C. Relative Humidity: 90 % max	Complies
C8	Complete Documentation	All documents provided per <a href="#">Table 13</a>	Complies
C9	Allows for transport	a. Fits in standard shipping container b. Forklift compatible	Complies Yes
C10	Low Maintenance Burden	a. Preventive Maintenance Cost b. Preventive Maintenance Hrs	<\$ TBD/yr < TBD/yr
C11	High Throughput	a. Cycle time b. Downtime for P/N change-over on automation	< 130 s < 10 min
C12	IT Department Requirements	a. Hardware guideline b. Software guideline c. Connectivity: wired UTP/RJ45 and Wireless N with external antenna d. Ergonomic access to computers within 60s e. Display language	Complies Complies Yes  Yes English+ Spanish
C13	Complies to Digital Factory Initiative	a. Traceability compliance b. Remote diagnostic capable	Yes Yes
C14	Mistake-Proofing	Poka-Yoke per Control Plan	Required
C15	Support for Location	a. Remote diagnostic and support capable b. Dispatch on-site technician	Yes <24 hrs

Equipment Requirements Summary

Figura 68. Reporte aceptación de proyecto Empresa Cliente

Este reporte mostrado en la Figura 68 se puede observar los principales objetivos alcanzados. Mientras que en la Tabla 7, se realiza una comparativa de cada uno de los requerimientos con los puntos logrados indicando donde se pueden consultar dichos puntos.

Tabla 7. Comparativa requerimientos – logros.

<b>Requerimiento</b>	<b>Punto logrado, sección indicado</b>
Análisis de riesgo en tres etapas	Punto C1, Figura 68
Diseño Mecánico bajo normativa ASME Y14.5M	Figuras 46, 47 48 y 49
Diseño Neumático (Análisis de Riesgo Diseño)	Sección 4.1.4, Figuras 28, 29, 30 y 31
Tiempo de vida útil de máquina 10 años	Punto C3, en Figura 68
Alimentación neumática considerar válvulas con sistema LOTO	Sección 4.1.4, Figura 33
Tiempo ciclo 2.6 min por pieza	Punto C11, en Figura 68
Tiempo cambios de modelo <10 min	Punto C11, en Figura 68
Uso de Poka – Yoke	Sección 4.2, Figuras 45 y 46
Interconexión a sistema y generación señal ANDON	Punto C13, en Figura 68
Minimizar fatiga, movimientos cadera laterales, movimientos laterales rígidos	Sección 4.2, Figuras 42, 43 y 44
Mantener posición ergonómica neutra	Sección 4.2, Figuras 42, 43 y 44
Dispositivos con peso apropiado	Sección 4.2, Tabla 6
Paneles HMI posicionados a nivel de ojos	Figura 11, Sección 4.1.5
Promedio de alturas hombre - mujer	Sección 4.1.5
Cambios de modelos deberán ser realizados por operadores	Sección 4.2, Figura 45

Elaboración propia

Como puede observarse cada requerimiento es evaluado y validado por diferentes departamentos. En caso del análisis de riesgo este es realizado por una empresa externa dedicada al servicio de seguridad industrial. Una vez que concluyo la evaluación y validación se generó el reporte de aceptación que se muestra.

## CONCLUSIONES

El objetivo planteado en este trabajo es Realizar la conceptualización, diseño y manufactura de un banco para la calibración de turbocargadores, desarrollando e integrando en cada una de estas etapas innovaciones en tecnologías de manufactura modernas para satisfacer los requerimientos de la empresa cliente en cuanto a seguridad, ergonomía, modularidad y flexibilidad a cambios de modelo.

En base a las especificaciones del cliente se define un proceso de diseño a realizar en tres etapas: conceptual, básico y a detalle. En la primera etapa los principales puntos a analizar son: tipo de producto, ambiente de trabajo, presupuesto y requerimientos principales del cliente. En el caso de una estación semiautomática deben incorporarse adicionalmente los conceptos de seguridad y ergonomía. Posteriormente se determina la parte compuesta la cual es la base para el desarrollo del diseño y la integración de los componentes, materiales y equipos, los cuales deben cubrir tanto la capacidad actual como futura para nuevos modelos de productos.

Una vez concluido el proceso de diseño se realiza la fabricación elementos estructurales y herramientas los cuales aseguran tanto la flexibilidad como la modularidad. Posteriormente se realiza la integración de otros equipos de línea que completan la función principal de la estación a diseñar.

Para finalizar el proceso se realizan pruebas de funcionamiento, seguridad y ergonomía tanto en sitio de fabricante como en la empresa cliente. Los resultados son validados tanto por una empresa certificadora externa como la empresa cliente.

En el caso del trabajo desarrollado motivo de este documento tal como se muestra en la parte de resultados referente a las pruebas aplicadas al equipo estas son satisfactorias según indica la Figura 61. Por lo tanto, con referencia a la hipótesis planteada el resultado es satisfactorio primeramente en cuanto al retorno de

inversión ya que un solo banco flexible permite la calibración por el momento de cuatro modelos de turbocargadores. En la parte técnica se garantiza el uso de equipos y la coordinación de los mismos para llevar a cabo la calibración con los requerimientos necesarios en cuanto a seguridad, ergonomía, modularidad, servicios (energías), cambios rápidos de modelo y trazabilidad de información de proceso y de turbocargadores de manera individual.

Finalmente dado que el banco de calibración flexible cumple con las certificaciones requeridas tiene la posibilidad de ser enviado a cualquier otra región del mundo o reproducir completamente dependiendo del criterio del cliente.

## RECOMENDACIONES

La fabricación del banco flexible de calibración alcanza los resultados de los objetivos planteados por la empresa cliente, en base tanto a sus necesidades, pero en especial por su presupuesto. El resultado tiene la opción de continuar con la automatización del banco flexible de calibración, en el momento en que la empresa cliente tenga las condiciones adecuadas y se dejó fincado el camino para alcanzar la automatización total.

Algunas propuestas para alcanzarla se enlistan a continuación:

1. Inicialmente se tiene como primera recomendación el desarrollo de nuevos herramientas / nidos para nuevos modelos, iniciando de los parámetros restrictivos de la parte compuesta y consideraciones dimensionales de los mismos.
2. Integración de un brazo robótico para realizar la carga y manipulación de materiales, así como el cambio de herramientas. Al momento ya se tiene la posibilidad de hacer el cambio rápido de los mismos.
3. Integración de impresora láser para grabado de código QR, para dar seguimiento y rastreabilidad de productos integrándolo también a las bases de datos de la empresa cliente.
4. Automatización de actividades semi-manuales, con el uso de herramientas o dispositivos para el movimiento automático de estos.

Estas son recomendaciones se alcanzaría la flexibilidad total del banco de calibración, sin perder de vista la relación costo / beneficio que se pueda tener en un futuro.

## **APORTACIÓN DE LA TESIS**

El uso de maquinaria flexible hoy en día es más común ya que al seguir la línea de mejora continua se pretende hacer más con menos. Por lo tanto la reducción de energía, recursos, materias primas, mano de obra, espacios y costos son los principales objetivos del desarrollo de cualquier ciencia y tecnología; el resultado de este proyecto fue la reducción de cuatro posibles máquinas a una sola máquina flexible mostrando la reducción significativamente de la inversión económica. Dejando el camino libre para la integración de nuevas tecnologías.

## **APORTACIÓN SOCIAL DE LA TESIS**

Hoy en día el desarrollo de ciencias y tecnologías tiene sus objetivos claros como se mostró anteriormente, pero para el desarrollo de estas tecnologías se debe de tener personas mayormente calificadas en las ramas de las tecnologías a desarrollar. Empresas, universidades y la sociedad están de cierta manera obligados a proveer a las personas conocimiento literario y empírico para llevar transiciones demográficas. El desarrollo de este proyecto abre la posibilidad de tener una referencia para el desarrollo de nuevos proyectos, por lo tanto, las aptitudes y habilidades deberán de ser mejores de las aquí propuestas; esto lleva a las competencias de las personas a un mayor grado.

## REFERENCIAS

- Ali, Hazrat, Akio Katsuki, Syuhei Kurokawa, and Takao Sajima. 2013. "Design of Mechanical Actuator in 3D CAD Software." *Procedia Engineering* 64: 473–78. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2013.09.121>.
- Anwer, Nabil et al. 2020. "Geometric Tolerance Characterization of Laser Powder Bed Fusion Processes Based on Skin Model Shapes." : 1–6.
- Anza, J J et al. 2012. "Computer Aided Forging Design." *Advanced Materials Research* 418–420.
- De Araujo, Silvio Alexandre, and Wellington Donizeti Previero. 2019. "Flexible Job Shop Problem with Variable Machine Flexibility." *IFAC-PapersOnLine* 52(10): 115–18. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.10.009>.
- Arav, B., R. Shulman, and V. Dooun. 2016. "Basic Concepts for Forcing of Low-Power Micro Turbine Generators." *Procedia Engineering* 150: 1384–90. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.333>.
- Arellano. 2019. "Obtención y Caracterización de Revestimientos Zn-Al-Cu Sobre Acero 1045 , Mediante Un Proceso de Empaquetamiento." : 185–92.
- Armillotta, Antonio. 2013. "A Method for Computer-Aided Specification of Geometric Tolerances." *CAD Computer Aided Design* 45(12): 1604–16. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cad.2013.08.007>.
- Arriaga, Isaac, Jose Cabrera, and Jorge Gutiérrez. 2019. "Diseño Mecánico Ágil : Nueva Propuesta Metodológica Enfocada a Proyectos de Desarrollo Tecnológico." *Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica* 6(4): 157–67.
- Arsie, Ivan et al. 2015. "Evaluation of CO2 Reduction in SI Engines with Electric Turbo-Compound by Dynamic Powertrain Modelling." *IFAC-PapersOnLine* 28(15): 93–100. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.10.014>.
- Ashby, M. F. 2011. *Materials Selection in Mechanical Design*. Butterworth-Heinemann.
- Becker, Christian, and Armin Scholl. 2006. "A Survey on Problems and Methods in Generalized Assembly Line Balancing." *European Journal of Operational Research* 168(3): 694–715.
- Beckers, Alexander et al. 2021. "Design of Economically-Optimized Manufacturing Process Sequences Using Cross-Process Models." *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 33: 15–29.
- Bolz, H., A. Rinaldi, and A. Kaufmann. 2014. Institution of Mechanical Engineers - 11th International Conference on Turbochargers and Turbocharging *Critical Aspects in Turbocharger Testing*. Woodhead Publishing Limited. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-081000-33-5.50022-6>.
- Brito, M., A. L. Ramos, P. Carneiro, and M. A. Gonçalves. 2017. "Combining SMED Methodology and Ergonomics for Reduction of Setup in a Turning Production

- Area." *Procedia Manufacturing* 13: 1112–19.  
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.172>.
- Cai, Wei, and Kee hung Lai. 2021. "Sustainability Assessment of Mechanical Manufacturing Systems in the Industrial Sector." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 135(August 2020): 110169.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110169>.
- Chacón, E., and M. Indriago. 2010. "Implementación de Supervisores En Una Arquitectura de Referencia Basadas En Sistemas de Manufactura Holónicos." *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI* 7(3): 72–82.
- Chen, Wen Bo, Wei Qiang Feng, Jian Hua Yin, and Lalit Borana. 2020. "LVDTs-Based Radial Strain Measurement System for Static and Cyclic Behavior of Geomaterials." *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation* 155.
- Chevalier, A., and Mariano. Domingo Padrol. 1997. *Dibujo Industrial*. Limusa.
- Córdoba Nieto, Ernesto. 2006. "Manufactura y Automatización." *Revista ingeniería e investigación* 26(3): 120–28.  
<http://revistas.unal.edu.co/index.php/ingev/article/view/14761>.
- Daniyan, Ilesanmi et al. 2020. "Design and Simulation of a Flexible Manufacturing System for Manufacturing Operations of Railcar Subassemblies." *Procedia Manufacturing* 54: 112–17.
- DeGarmo, E. Paul., J. Temple Black, and Ronald A. Kohser. 1988. *Materiales y Procesos de Fabricación*. Reverté.
- Diaz C., Jenny L., and Carlos Ocampo-Martinez. 2021. "Non-Centralised Control Strategies for Energy-Efficient and Flexible Manufacturing Systems." *Journal of Manufacturing Systems* 59(March): 386–97.
- Ferro, Paolo, and Franco Bonollo. 2019. "Materials Selection in a Critical Raw Materials Perspective." *Materials and Design* 177: 107848.  
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107848>.
- Francas, David, Nils Löhndorf, and Stefan Minner. 2011. "Machine and Labor Flexibility in Manufacturing Networks." *International Journal of Production Economics* 131(1): 165–74.
- Ge, Yanlin, Lingen Chen, Fengrui Sun, and Chih Wu. 2005. "Thermodynamic Simulation of Performance of an Otto Cycle with Heat Transfer and Variable Specific Heats of Working Fluid." *International Journal of Thermal Sciences* 44(5): 506–11.
- Gonca, Guven et al. 2015. "Comparison of Steam Injected Diesel Engine and Miller Cycled Diesel Engine by Using Two Zone Combustion Model." *Journal of the Energy Institute* 88(1): 43–52. <http://dx.doi.org/10.1016/j.joei.2014.04.007>.
- Groover, Mikell P. 2008. *Automation, Production Systems, and Computer-*

*Integrated Manufacturing*. Prentice Hall.

- Groover, Mikell P., Carlos M. de la Peña Gómez, Miguel Angel Martínez Sarmiento, and Francisco J. Sandoval Palafox. 1997. *Fundamentos de Manufactura Moderna: Materiales, Procesos y Sistemas*. Prentice-Hall.
- Gujarathi, G P, and Y Ma. 2011. "Parametric CAD / CAE Integration Using a Common Data Model." 30: 118–32.
- Gust, Peter, and Christoph Schluer. 2013. "Numerical Investigation into the Impact of Dimensional and Geometric Tolerances on the Long-Life Fatigue Strength of Mechanical Components." *Procedia CIRP* 10: 37–43.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2013.08.010>.
- Hameri, Ari Pekka. 2011. "Production Flow Analysis-Cases from Manufacturing and Service Industry." *International Journal of Production Economics* 129(2): 233–41. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2010.10.015>.
- Hashemi-Petroodi, S. Ehsan et al. 2020. "Workforce Reconfiguration Strategies in Manufacturing Systems: A State of the Art." *International Journal of Production Research*.
- Hermann, L., J. Rey, S. Barth, and T. Bergs. 2020. "Systematic Generation of Manufacturing Changes for Safety-Critical Components." *Journal of Manufacturing Systems* 56(June): 270–80.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.06.008>.
- Hoffman, Robert, and Sophie Gröger. 2019. "Closed Loop Geometrical Tolerance Engineering with Measuring Data for Reverse Information Processing." *Procedia CIRP* 81: 1360–65.
- Jaskó, Szilárd et al. 2020. "Development of Manufacturing Execution Systems in Accordance with Industry 4.0 Requirements : A Review of Standard- and Ontology-Based Methodologies and Tools." *Computers in Industry* 123.
- Jbira, I., M. Tlija, B. Louhichi, and A. Tahan. 2017. "CAD/Tolerancing Integration: Mechanical Assembly with Form Defects." *Advances in Engineering Software* 114: 312–24.
- Karl T. Ulrich, and Steven D. Eppinger. 2004. *Diseño y Desarrollo de Productos*. Quinta ed. McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.
- Kesgin, Ugur. 2005. "Effect of Turbocharging System on the Performance of a Natural Gas Engine." *Energy Conversion and Management* 46(1): 11–32.
- Kück, Mirko, and Michael Freitag. 2021. "Forecasting of Customer Demands for Production Planning by Local K-Nearest Neighbor Models." *International Journal of Production Economics* 231: 107837.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107837>.
- Lee, Dong Kyu, Jeong Hoon Shin, and Dong Ho Lee. 2020. "Operations Scheduling for an Advanced Flexible Manufacturing System with Multi-Fixturing Pallets." *Computers and Industrial Engineering* 144(April).

- Li, Jiming et al. 2020. "Research on Recommendation and Interaction Strategies Based on Resource Similarity in the Manufacturing Ecosystem." *Advanced Engineering Informatics* 46(September): 101183.  
<https://doi.org/10.1016/j.aei.2020.101183>.
- Li, Yufeng et al. 2020. "An Optimization Method for Energy-Conscious Production in Flexible Machining Job Shops with Dynamic Job Arrivals and Machine Breakdowns." *Journal of Cleaner Production* 254: 120009.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120009>.
- Lin, Bor Tsuen, and Chun Chih Kuo. 2009. "Application of an Integrated RE/RP/CAD/CAE/CAM System for Magnesium Alloy Shell of Mobile Phone." *Journal of Materials Processing Technology* 209(6): 2818–30.
- Lu, Yuqian, Xun Xu, and Lihui Wang. 2020. "Smart Manufacturing Process and System Automation – A Critical Review of the Standards and Envisioned Scenarios." *Journal of Manufacturing Systems* 56(June): 312–25.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.06.010>.
- Mahmoudi, Amir Reza, Iman Khazaei, and Mohsen Ghazikhani. 2017. "Simulating the Effects of Turbocharging on the Emission Levels of a Gasoline Engine." *Alexandria Engineering Journal* 56(4): 737–48.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.aej.2017.03.005>.
- Mansuy, Mathieu, Max Giordano, and Pascal Hernandez. 2011. "A New Calculation Method for the Worst Case Tolerance Analysis and Synthesis in Stack-Type Assemblies." *CAD Computer Aided Design* 43(9): 1118–25.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.cad.2011.04.010>.
- Masi, A. et al. 2014. "A High Precision Radiation-Tolerant LVDT Conditioning Module." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 745: 73–81.
- Matta, A K, D Ranga Raju, and K N S Suman. 2015. "The Integration of CAD / CAM and Rapid Prototyping in Product Development : A Review." *Materials Today: Proceedings* 2(4–5): 3438–45. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2015.07.319>.
- Mazur, Maciej, Martin Leary, and Aleksandar Subic. 2011. "Computer Aided Tolerancing (CAT) Platform for the Design of Assemblies under External and Internal Forces." *CAD Computer Aided Design* 43(6): 707–19.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.cad.2011.02.004>.
- Mechanical, The American Society of, and Engineers. 2009. "Dimensioning and Tolerancing." *The American National Standards Institute ASME Y14.5*.
- Messner, M. et al. 2019. "Closed Loop Cycle Time Feedback to Optimize High-Mix / Low-Volume Production Planning." *Procedia CIRP* 81: 689–94.  
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.177>.
- Mgbemena, Chika Edith et al. 2020. "Ergonomic Evaluation on the Manufacturing Shop Floor: A Review of Hardware and Software Technologies." *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 30(2019): 68–78.

<https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.04.003>.

Muniraj, Santhana Pandiyan, and Xun Xu. 2021. "An Implementation of OPC UA for Machine-to-Machine Communications in a Smart Factory." *Procedia Manufacturing* 53: 52–58.

Naber, J. D., and J. E. Johnson. 2014. "Internal Combustion Engine Cycles and Concepts." *Alternative Fuels and Advanced Vehicle Technologies for Improved Environmental Performance: Towards Zero Carbon Transportation*: 197–224.

Nakeenopakun, Nara, and Yingyot Aue-U-lan. 2019. "An Application for the Geometrical Based Optimization for a Common Tool Design in Cold Forging Process." *Materials Today: Proceedings* 17: 1702–10.  
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.06.201>.

Oliveira, J., J. C. Sá, and A. Fernandes. 2017. "Continuous Improvement through 'Lean Tools': An Application in a Mechanical Company." *Procedia Manufacturing* 13: 1082–89.

Pantoja, Cielo, Juan Pablo Orejuela, and Juan José Bravo. 2017. "Plant Layout Methodology in Cellular Manufacturing Systems." *Estudios Gerenciales* 33(143): 132–40. <http://dx.doi.org/10.1016/j.estger.2017.03.003>.

Paraschos, Panagiotis D., Georgios K. Koulinas, and Dimitrios E. Koulouriotis. 2020. "Reinforcement Learning for Combined Production-Maintenance and Quality Control of a Manufacturing System with Deterioration Failures." *Journal of Manufacturing Systems* 56: 470–83.

Park, Hong-seok, and Xuan-phuong Dang. 2010. "Structural Optimization Based on CAD – CAE Integration and Metamodeling Techniques." *Computer-Aided Design* 42(10): 889–902. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cad.2010.06.003>.

Parlak, Adnan. 2005. "The Effect of Heat Transfer on Performance of the Diesel Cycle and Exergy of the Exhaust Gas Stream in a LHR Diesel Engine at the Optimum Injection Timing." *Energy Conversion and Management* 46(2): 167–79.

Peat, K. S., A. J. Torregrosa, A. Broatch, and T. Fernández. 2006. "An Investigation into the Passive Acoustic Effect of the Turbine in an Automotive Turbocharger." *Journal of Sound and Vibration* 295(1–2): 60–75.

Perraudat, Antoine, Stéphane Dauzère-Pérès, and Philippe Vialletelle. 2021. "Robust Tactical Qualification Decisions in Flexible Manufacturing Systems." *Omega* 106: 102537.  
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0305048321001468>.

Pierre, Laurent, Oussama Rouetbi, and Bernard Anselmetti. 2018. "Tolerance Analysis of Hyperstatic Mechanical Systems with Deformations." *Procedia CIRP* 72: 237–42.

Pitakaso, Rapeepan, Sethanan Kanchana, Ganokgarn Jirasirilerd, and Paulina Golinska. 2021. "A Novel Variable Neighborhood Strategy Adaptive Search for

- SALBP-2 Problem with a Limit on the Number of Machine's Types." *Annals of Operations Research*.
- Popp, Richard S.H., Corinna Liebl, and Michael F. Zaeh. 2016. "Energy Flexible Machine Tool Components - An Investigation of Capabilities." *Procedia CIRP* 57: 692–97. <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.120>.
- Poran, Arnon, and Leonid Tartakovsky. 2015. "Energy Efficiency of a Direct-Injection Internal Combustion Engine with High-Pressure Methanol Steam Reforming." *Energy* 88: 506–14. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2015.05.073>.
- Powell, Daryl J. 2018. "Kanban for Lean Production in High Mix, Low Volume Environments." *IFAC-PapersOnLine* 51(11): 140–43. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.248>.
- Qin, Sheng Feng, Pablo A. Prieto, and David K. Wright. 2008. "A Novel Form Design and CAD Modelling Approach." *Computers in Industry* 59(4): 364–69.
- Querol, E., F. Romero, A. M. Estruch, and J. Serrano. 2015. "Design of the Architecture of a Flexible Machining System Using IEC61499 Function Blocks." *Procedia Engineering* 132: 934–41. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.580>.
- Qureshi, Ahmed Jawad et al. 2012. "A Statistical Tolerance Analysis Approach for Over-Constrained Mechanism Based on Optimization and Monte Carlo Simulation." *CAD Computer Aided Design* 44(2): 132–42. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cad.2011.10.004>.
- Rameau, Jean François, Philippe Serré, and Mireille Moinet. 2018. "Clearance vs. Tolerance for Rigid Overconstrained Assemblies." *CAD Computer Aided Design* 97: 27–40. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2017.12.001>.
- Russell, Arya, and Sharareh Taghipour. 2019. "Multi-Objective Optimization of Complex Scheduling Problems in Low-Volume Low-Variety Production Systems." *International Journal of Production Economics* 208(October 2018): 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.11.005>.
- Santhosh, K. V., and B. K. Roy. 2017. "Online Implementation of an Adaptive Calibration Technique for Displacement Measurement Using LVDT." *Applied Soft Computing Journal* 53: 19–26. <http://dx.doi.org/10.1016/j.asoc.2016.12.032>.
- Schuh, Günther, Christoph Kelzenberg, Jan Wiese, and Niklas Kessler. 2020. "Creation of Digital Production Twins for the Optimization of Value Creation in Single and Small Batch Production." *Procedia CIRP* 93: 222–27. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.04.125>.
- SIEMENS. 2011. "Hoja de Datos Del Producto 6ED1052-1FB00-0BA7." (6): 10–11.
- Socconini, Luis. 2008. *Lean Manufacturing Paso a Paso*. Cuarta Ed. ed. S.A. de C.V. Norma Ediciones. Tlalnepantla, Estado de México.
- Stanistreet, T. F., J. M. Allwood, and A. M. Willoughby. 2006. "The Design of a

- Flexible Model Ring Rolling Machine." *Journal of Materials Processing Technology* 177(1–3): 630–33.
- The American Society of Mechanical Engineers. 2003. "Dimensioning and Tolerancing Principles for Gages and Fixtures." *The American National Standards Institute ASME Y14.4*.
- Ullman, David G. 2010. 40 McGraw-Hill *The Mechanical Design Process, 4th Edition*.
- Vázquez, J Rafael Mendoza, Apolo Z Escudero Uribe, and Irma D Rojas Cuevas. 2014. "Diseño y Construcción de Un Mecanismo Paralelo Para Prototipo de Prótesis Transhumeral."
- Veres, Cristina, Liviu Marian, Sorina Moica, and Karam Al-Akel. 2018. "Case Study Concerning 5S Method Impact in an Automotive Company." *Procedia Manufacturing* 22: 900–905. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.03.127>.
- Vijay, S., and M. Gomathi Prabha. 2020. "Work Standardization and Line Balancing in a Windmill Gearbox Manufacturing Cell: A Case Study." *Materials Today: Proceedings* (xxxx). <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.584>.
- Villanueva, Sergio A, and Jorge Watanave. 1994. *Manual de Métodos de Fabricación Metalmeccánica*. 4th, reimpre ed. ed. AGT.
- Wahab, M. I.M., and S. J. Stoyan. 2008. "A Dynamic Approach to Measure Machine and Routing Flexibilities of Manufacturing Systems." *International Journal of Production Economics* 113(2): 895–913.
- Wang, Jin et al. 2021. "Evolutionary Game Based Real-Time Scheduling for Energy-Efficient Distributed and Flexible Job Shop." *Journal of Cleaner Production* 293: 126093.
- Warren, Nick. 2004. Ergonomics and the Management of Musculoskeletal Disorders: Second Edition *The Expanded Definition of Ergonomics*. Elsevier Inc. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-7506-7409-6.50013-0>.
- Woodyard, Doug. 2009. "Pressure Charging." *Pounder's Marine Diesel Engines and Gas Turbines*: 173–233.
- Wu, Chuanxun, Xiaofeng Hu, Yahui Zhang, and Pengfei Wang. 2019. "A Modified Monte-Carlo Tree Search Algorithm for Two-Sided Assembly Line Balancing Problem." *IFAC-PapersOnLine* 52(13): 1920–24. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.483>.
- Wuthrich, Rolf, and Lucas A. Hof. 2019. "Low Batch Size Production of Glass Products Requiring Micrometer Precision." *IFAC-PapersOnLine* 52(10): 319–22. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.10.050>.
- Zanchettin, Andrea Maria. 2021. "Robust Scheduling and Dispatching Rules for High-Mix Collaborative Manufacturing Systems." *Flexible Services and Manufacturing Journal*.
- Zhang, Hong-yang, Tong-chun Li, and Zong-kun Li. 2009. "Modeling in SolidWorks

and Analysis of Temperature and Thermal Stress during Construction of Intake Tower." *Water Science and Engineering* 2(1): 95–102.  
<http://dx.doi.org/10.3882/j.issn.1674-2370.2009.01.009>.

## **ANEXOS**

## ANEXO A

En la selección de las cortinas de seguridad su resolución es de 14mm, por lo tanto, en la distancia adicional  $C = 0$  mm como se puede ver en la Figura A1.



Imagen aproximada

CE cULus KCS GB

Resolución	Alcance	Altura del campo de protección	Parte del sistema	Tipo	N.º de artículo
14 mm	10 m	1.500 mm	Receptor	C4C- <u>EA15010A10000</u>	1211483

Otros modelos del dispositivo y accesorios → [www.sick.com/de/tec](http://www.sick.com/de/tec)

Datos técnicos detallados

Características

Aplicación	Entorno industrial estándar
Parte del sistema	Receptor
Emisor compatible	1211482
Resolución	14 mm
Alcance	10 m
Altura del campo de protección	1.500 mm
Tiempo de respuesta	18 ms

Figura 69. Cortinas ópticas de seguridad  
Elaboración propia

La Figura A2 se muestra la hoja de datos de las electroválvulas de centros cerrados, tomamos el mayor tiempo de conmutación para el cálculo de distancia en cortinas ópticas de seguridad.

**Electroválvulas VUVG-L14 y VUVG-S14, válvulas de conexiones roscadas G1/8**



Hoja de datos

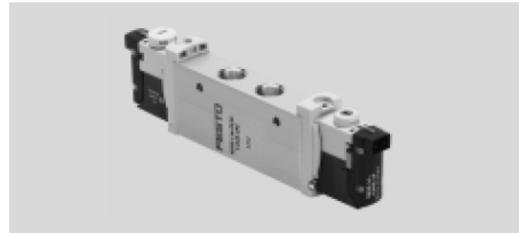
Funcionamiento  
2x 3/2C, 2x 3/2U, 2x 3/2H  
5/2 vías, monoestable  
5/2 vías, biestable  
**5/3C, 5/3U, 5/3E**

Tamaño de válvula 14 mm

Caudal  
480 ... 730 l/min

Tensión  
5, 12 y 24 V DC

Símbolo del circuito → página 13



Especificaciones técnicas generales VUVG-L G1/8										
Función de la válvula	T32-A			T32-M			M52-A	B52	M52-M	<b>P53</b>
Posición normal	C <sup>1)</sup>	U <sup>2)</sup>	H <sup>4)</sup>	C <sup>1)</sup>	U <sup>2)</sup>	C <sup>1)</sup>	–	–	–	C <sup>1)</sup> U <sup>2)</sup> E <sup>3)</sup>
Comportamiento	Monoestable						Biestable		Monoestable	
Reposición por muelle neumático	Sí			No			Sí	–	No	–
Reposición por muelle mecánico	No			Sí			No	–	Sí	–
Funcionamiento con vacío en conexión 1	No			Únicamente con alimentación externa del aire de pilotaje						
Forma constructiva	Distribuidor axial									
Tipo de junta	Blanda									
Tipo de accionamiento	Eléctrico									
Tipo de mando	Servopilotado									
Alimentación del aire de pilotaje	Pilotaje interno o externo									
Función de escape	Estrangulable									
Accionamiento manual auxiliar	Sin enclavamiento, cubierto, sin y con enclavamiento o bien con enclavamiento, a elegir									
Tipo de fijación	Con taladros pasantes <sup>5)</sup> o en perfil distribuidor, a elegir									
Posición de montaje	Indistinta									
Paso nominal	[mm] 4,6			4,3			5,6			
Caudal nominal normal	[l/min] 650 600 650			550 500 500			730	780	650 600	
Caudal en perfil distribuidor	[l/min] 620 580			520 480 480			680	730	620 580	
Tiempo de conmutación conexión/desconexión	[ms] <b>12/25</b>			<b>11/18</b>			<b>14/22</b>	–	<b>13/37</b>	<b>12/40</b>
Tiempo de conmutación	[ms] –			–			8	–	14	
Tamaño de válvula	[mm] 14			14						

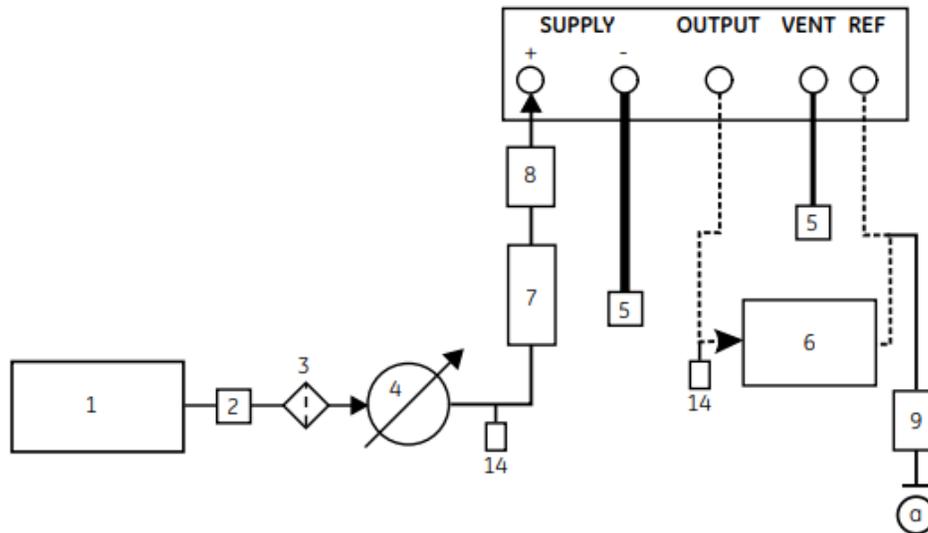
Figura 70. Datos Electroválvulas  
Elaboración propia

## ANEXO B

La Figura B1 se muestra un ejemplo de la conexión adecuada para el equipo PACE 5000.

### Pneumatic Connection Examples [Ref: Figures 2-3, 2-4 and 2-5]

The examples that follow show a single channel connection detail, using supply equipment described above.



**Figure 2-3, Pneumatic Connections without vacuum supply**

- |  |                                 |                        |
|--|---------------------------------|------------------------|
| 1) Pressure source                             | 2) Conditioner                  | 3) Filter              |
| 4) Regulate to between 110% full-scale and MWP | 5) Diffuser*                    |                        |
| 6) Unit under test                             | 7) Optional reservoir †         | 8) Protection device ⊕ |
| 9) Optional differential connection ★          | 14) Manual external vent valves |                        |
| a) Atmosphere                                  |                                 |                        |

Figura 71. Diagrama neumático conexión PACE 5000  
Elaboración propia